



Étude du taux d'érosion des vases de Loire en laboratoire

Khosrow HOSSEINI

Chercheur, LGCNSN, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Nantes.

Martin SANCHEZ

Maître de conférences, LGCNSN, Fac. des Sciences et Techniques, U. de Nantes.

Alain GROVEL

Professeur, LGCNSN, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Nantes.

Résumé :

Le but de ce travail est d'étudier le taux d'érosion lorsque les conditions critiques de remise en suspension sont franchies. On s'intéresse particulièrement aux relations existant entre les actions hydrodynamiques, le comportement rhéologique des vases, et la remise en suspension des sédiments, sans chercher a priori une loi d'érosion quelconque.

Cinq séries d'essais d'érosion sur une vase de Loire sont réalisées en laboratoire pour 5 concentrations différentes ; pour chaque concentration on effectue 3 essais successifs afin de pouvoir examiner les résultats statistiquement.

Un piège à sédiment intégré dans le dispositif expérimental utilisé, permet d'obtenir un échantillon de matériau érodé en fin d'essai et l'on peut ainsi mesurer la taille des flocons de vase lorsque l'érosion se produit par arrachement de copeaux.

1. Introduction

Les apports liquides d'un fleuve transportent des quantités variables de matériaux fins en suspension issus du lessivage des sols. En amont des estuaires, les vitesses sont toujours dirigées vers la mer et d'une intensité suffisante pour assurer le transport en suspension des matériaux très fins jusqu'à l'intérieur des estuaires.

Au sein des estuaires, les oscillations de la marée s'accompagnent d'une variation périodique des vitesses longitudinales affectant le mouvement des particules en suspension qui ne suivent plus une descente continue vers la mer, mais sont affectées du même mouvement alternatif que les courants (Berthois, 1964). Hormis le transport en suspension des matériaux fins, on y observe les processus sédimentaires suivants : le dépôt des matières en suspension (avec formation éventuelle de *crème de vase*), le tassement des dépôts, et la remise en suspension de la crème de vase ainsi que d'une partie des matériaux consolidés.

Dans l'estuaire de la Loire, on observe que la dynamique de la vase est associée au cycle bimensuel de marées de la façon suivante (CSEEL, 1984) :

- dès que les coefficients de marée tombent au-dessous de 70, la presque totalité des vases en suspension se déposent rapidement pour former une lentille de crème de vase,
- la crème de vase subit un tassement au cours de 5 ou 6 jours de mortes-eaux,

- dès que les coefficients de marée dépassent 75 à 80, la crème de vase est remise en suspension et il ne reste au fond que la fraction qui a été suffisamment consolidée au cours du tassement. A la suite de cette remise en suspension, la teneur en matières en suspension peut devenir très élevée et constituer ce que l'on appelle le *bouchon vaseux*.

L'érosion est donc le principal mécanisme sédimentaire à l'origine de la forte turbidité souvent observée dans les estuaires.

2. Conditions critiques de début d'érosion

L'érosion des matériaux cohésifs dépend essentiellement des actions hydrodynamiques et du comportement mécanique des sédiments. La caractérisation la plus simple du comportement mécanique ou rhéologique d'une vase, se fait en mesurant, soit sa cohésion non drainée c_u , soit sa rigidité initiale τ_y , à l'aide d'un appareil approprié.

Le comportement mécanique ou rhéologique des vases est très variable d'un sédiment à un autre selon leurs composantes : minéraux argileux, débris d'organismes, matière organique, oxydes divers, métaux, Mais, pour un sédiment donné, on considère que son comportement dépend exclusivement de sa teneur en eau ou de sa concentration en matières sèches C .

Le début d'érosion des matériaux cohésifs peut être considéré comme une rupture, ou comme une perte de l'homogénéité de l'ensemble solide-eau. Selon Partheniades (1965), l'érosion se produit lorsque la tension de cisaillement exercée par l'eau en écoulement sur le fond τ_o franchit un seuil critique en accord avec l'expression suivante :

$$\tau_o > \tau_{o_c} = k c' \quad (1)$$

où : τ_{o_c} est la tension de cisaillement critique d'érosion, c' la cohésion mesurée à l'aide d'un appareil donné, et k un coefficient de proportionnalité dépendant essentiellement du degré de turbulence et de l'appareil utilisé pour mesurer c' . Cette relation est en accord avec le critère de rupture de Coulomb, mais malheureusement, Partheniades ne fournit pas de renseignements concernant le coefficient k .

Le début d'érosion a été étudié d'une façon très approfondie par Migniot (1989). Dans ses études, l'action de l'écoulement sur le fond est caractérisée par la vitesse de cisaillement u_* , définie par :

$$u_* = \sqrt{\tau_o / \rho} \quad (2)$$

où : ρ est la masse volumique du fluide.

Migniot constate que la vitesse de cisaillement critique d'érosion dépend de la concentration du sédiment, mais chaque sédiment a sa propre loi de début d'érosion. En revanche, Migniot établit une loi universelle de début d'érosion pour les matériaux cohésifs en fonction de la rigidité initiale mesurée à l'aide d'un viscosimètre Brookfield LVT, en suivant un protocole d'essais bien défini. Cette loi s'écrit comme suit :

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

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

Il est intéressant de remarquer que la loi de début d'érosion des vases plastiques proposée par Migniot est semblable à celle de Partheniades, car cette première peut être mise sous la forme suivante :

$$\tau_{oc} = \rho (0,009)^2 \tau_y = 0,081 \tau_y \quad (4)$$

En fait, les mécanismes de l'érosion sont très différents suivant le comportement des dépôts de vase.

Pour les sédiments peu concentrés (vases fluides), l'érosion se produit par bouffées, on voit d'abord apparaître une ondulation à l'interface, puis celle-ci s'amplifie, déformant de plus en plus la couche de sédiments ; ceux-ci sont finalement entraînés sous forme de filets de vase, puis dilués dans l'eau du courant superficiel (Périgaud, 1983).

Pour les sédiments très concentrés (vases plastiques), l'érosion se produit par l'arrachement de petits copeaux de matériau (Périgaud, 1983). Ces copeaux de matériau se diluent très difficilement dans les eaux et sont transportés en forme de galets de faible masse volumique mais forte cohésion. Dans la plupart des cas, l'érosion prend naissance à partir d'un point préférentiel (particules de sable, puits de drainage, etc.).

3. Caractérisation du comportement mécanique des vases

La vase étudiée a été prélevée au port de Trentemoult dans l'estuaire de la Loire. Il s'agit d'une vase superficielle fraîchement déposée ayant une concentration *in situ* de 310 kg/m^3 et dont la masse volumique de la fraction solide est de 2550 kg/m^3 .

Les limites d'Atterberg de cette vase sont :

Limite de liquidité : $w_L = 141\%$,

Limite de plasticité : $w_P = 70\%$,

Le comportement mécanique de la vase est caractérisé par deux grandeurs mesurées en laboratoire :

- a) La cohésion non drainée c_u , mesurée à l'aide d'un densimètre type torpille ; le principe de la mesure est que la différence entre la masse volumique apparente mesurée au densimètre, et la masse volumique réelle, est expliquée par la cohésion non drainée agissant sur la surface immergée du densimètre.
- b) La rigidité initiale de la vase τ_y mesurée en utilisant un viscosimètre de type Brookfield ; le principe est ici de mesurer le moment de torsion nécessaire pour mettre en mouvement un cylindre immergé dans un matériau.

Les mesures sont réalisées en suivant un protocole bien défini (Hosseini, 1995). Étant donné que des études préalables (Hosseini, 1995) ont montré que pour une même concentration et un même matériau, les valeurs de c_u et τ_y peuvent varier considérablement entre deux mesures successives, les valeurs retenues dans ce travail sont les moyennes de 10 mesures successives pour c_u , et de 15 mesures successives pour τ_y .

Les expériences d'érosion en laboratoire ont été réalisées pour 5 concentrations différentes : 100, 160, 210, 260 et 310 kg/m³. Pour chaque concentration 3 essais d'érosion sont réalisés, et pour chaque essai on mesure c_u , τ_y , et les écarts-type propres aux mesures. Le tableau I résume les résultats de ces mesures.

			Concentration				
			100 kg/m ³	160 kg/m ³	210 kg/m ³	260 kg/m ³	310 kg/m ³
c_u [Pa]	essai n° 1	moyenne	0,735	1,216	6,548	41,083	105,014
		écart-type	0,154	0,235	0,464	1,098	6,017
	essai n° 2	moyenne	0,754	1,276	6,950	40,424	99,000
		écart-type	0,171	0,223	0,713	0,874	3,398
	essai n° 3	moyenne	0,742	1,127	5,946	40,601	98,867
		écart-type	0,162	0,189	0,499	1,342	2,246
τ_y [Pa]	essai n° 1	moyenne	0,721	1,186	5,289	19,227	55,144
		écart-type	0,104	0,179	0,843	4,461	16,241
	essai n° 2	moyenne	0,732	1,132	5,254	19,117	53,272
		écart-type	0,110	0,160	0,942	5,062	15,833
	essai n° 3	moyenne	0,728	1,217	5,254	22,782	57,140
		écart-type	0,108	0,150	0,758	5,466	18,000

Tableau I.- Mesures de c_u et de τ_y .

4. Dispositif expérimental pour l'érosion

Un système hydraulique a été conçu spécialement pour cette étude. Il s'agit d'un circuit fermé où la circulation d'eau est assurée par une pompe centrifuge.

Le système, qui est schématisé sur la figure 1, comporte 1 pompe, 1 veine d'essais de section rectangulaire, 1 débitmètre, 2 vannes, 1 réservoir de régulation, 2 transitions section circulaire-rectangulaire, et des conduites à section circulaire en PVC ($\phi_{\text{intérieur}} = 0,0083$ m) assurant les liaisons entre les différents éléments du système.

Compte tenu de l'espace disponible en laboratoire et de la large gamme de vitesses que l'on souhaite générer, on a opté pour une veine d'essais confinée ne présentant pas de surface libre.

Les dimensions de la veine d'essais sont (figure 2) : 2 m de longueur, 0,12 m de largeur et 0,05 m de profondeur. Un bac à sédiments est situé au milieu de la veine d'essais où l'écoulement est le plus uniforme. Les dimensions de ce bac sont : 1 m de longueur, 0,05 m de profondeur, et, afin d'éviter les phénomènes de bord, on a limité la largeur à 0,08 m.

En aval du bac à sédiments on a mis en place un piège à sédiments permettant d'attraper les flocons de vase lorsque l'érosion se produit par arrachement de copeaux, et ainsi pouvoir mesurer leur taille.

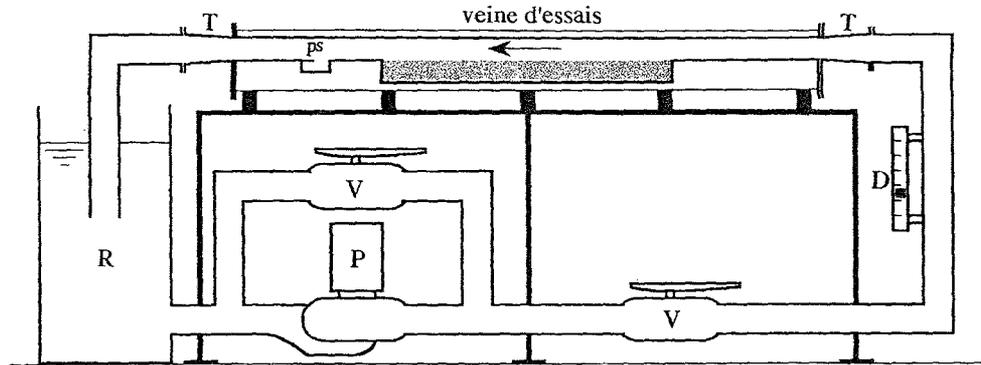


Figure 1.- Schéma du système expérimental pour l'érosion (P=pompe, V=vanne, R=réservoir, D=Débitmètre, T=Transition, ps=piège à sédiment).

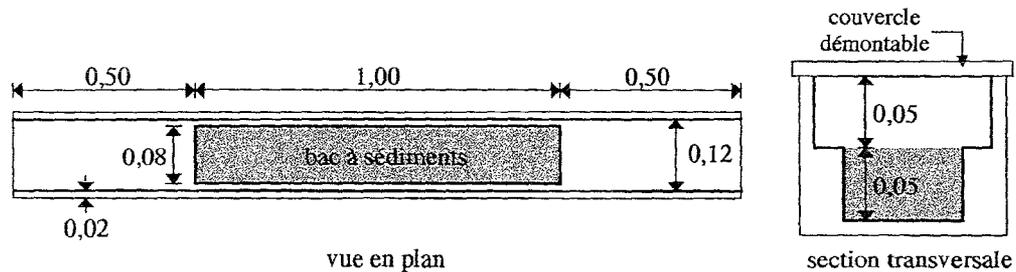


Figure 2.- Schéma de la veine d'essais (hors échelle, longueurs en mètres).

5. Comportement hydraulique de la veine d'essais

La tension de cisaillement au fond en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement V , est calculée grâce à l'équation qui suit :

$$\tau_o = c_f \rho \frac{V^2}{2} \quad (5)$$

où : c_f est un coefficient de frottement. Dans cette étude on considère que c_f est une constante pour chaque essai réalisé sur un lit de vase de concentration constante.

Au cours de chaque essai on mesure la différence de pression entre deux points : l'un situé à la limite aval du bac à sédiments et l'autre situé à la limite amont de ce bac. Le coefficient de frottement propre à chaque essai est déterminé grâce à la mesure de V , associée à une tension de cisaillement au fond τ_o estimée à partir de la mesure de la pression différentielle Δp par la formule suivante :

$$\tau_o = \delta \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (6)$$

où : δ est l'épaisseur de la couche limite ($\delta=0,025$ m) et Δx la distance séparant les deux capteurs de pression. La vitesse d'écoulement maximale mesurable grâce au débitmètre est $V_{max}=1,25$ m/s. En prenant la valeur moyenne du coefficient c_f mesurée pour $C=310$ kg/m³, qui vaut $c_f=0,014$, à cette vitesse correspond une tension de cisaillement au fond maximale qui vaut environ $\tau_{o,max} \approx 10,9$ Pa.

Dans le but de valider le dispositif expérimental d'érosion, on a mesuré les tensions de cisaillement au fond critiques de mise en mouvement de 5 sables différents. Le

critère de début de mouvement retenu, correspond à un écoulement entraînant un mouvement généralisé de particules de sable en surface, lorsqu'un observateur ne peut pas distinguer individuellement chacune des particules en mouvement. Ces mesures sont comparées avec la loi de Shields à la figure 3.

Ces essais sur sable ont également permis de constater que le mouvement de sable se produit uniformément sur toute la surface du bac à sédiment, ce qui permet d'affirmer que l'écoulement d'eau sur cette surface est uniforme, tout au moins pour une érosion faible de la couche de sédiments, inférieure à environ 2 mm.

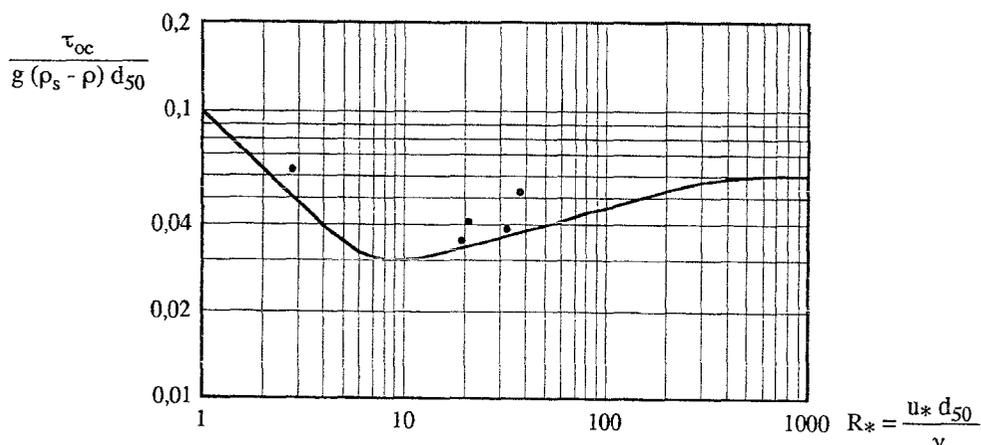


Figure 3.- Conditions critiques de mise en mouvement des matériaux non cohésifs.
En trait continu : courbe de Shields. En points : résultats de cette étude.

6. Essais d'érosion de vases

Cinq séries d'essais d'érosion sur une vase de Loire sont réalisées pour 5 concentrations différentes ; pour chaque concentration on effectue 3 essais successifs afin de pouvoir examiner les résultats statistiquement.

Pour chaque série d'essais on utilise un même échantillon de vase d'environ 18 litres. La concentration de cet échantillon est constante et obtenue à partir du matériau brut prélevé à Trentemoult, en ajoutant une certaine quantité d'eau du robinet. Cet échantillon de 18 litres est homogénéisé par malaxage et conservé dans un récipient fermé. Chaque échantillon permet de réaliser 3 essais successifs d'érosion, car pour chaque essai on utilise 4 litres pour remplir le bac à sédiment et environ 2 litres pour mesurer les paramètres caractéristiques de la vase : concentration, cohésion non drainée mesurée à l'aide d'un densimètre du type torpille, et rigidité initiale mesurée avec un viscosimètre Brookfield.

La vase est homogénéisée une nouvelle fois juste avant d'être mise en place dans le bac à sédiment. La mise en place est faite par couches afin d'éviter la présence de bulles d'air dans le sédiment.

Afin d'obtenir une surface "rugueuse" dès le début des essais, on a découpé une couche supérieure de 1 mm qui débordait le bac à sédiment. Cette opération est réalisée en striant la surface à l'aide d'une grille et en utilisant un contre-courant pour chasser cette fine couche. Ceci n'est pas possible pour les concentrations de 100 et 160 kg m⁻³, car la vase est alors très liquide.

Les essais sont réalisés en augmentant graduellement les vitesses par paliers. En début d'essai, chaque palier dure 5 minutes et si l'on n'observe pas d'érosion on passe à une vitesse supérieure. Ensuite, lorsque l'on observe un début d'érosion, on maintient la vitesse constante environ 30 minutes. Par la suite, on augmente encore la vitesse, et la durée de chaque palier est de plus en plus courte, mais cette durée est suffisante pour déceler visuellement une claire augmentation de la turbidité. L'essai est arrêté lorsque la couche de sédiments est érodée d'une façon très importante. A chaque palier, on mesure la vitesse et la différence de pression Δp . Ces mesures permettent le calcul de τ_o propre à chaque palier.

Le débit solide d'érosion lié à chaque palier est déterminé grâce à la différence entre les teneurs en matières en suspension ΔC_{MES} mesurées en début et fin du palier. Le débit solide d'érosion Q_s est donné par :

$$Q_s = \frac{\vartheta \Delta C_{MES}}{A \Delta t} \quad (7)$$

où : ϑ est le volume total d'eau dans le système, A la surface de la couche de sédiment, et Δt la durée du palier. La figure 4 montre Q_s en fonction de τ_o pour les 5 concentrations étudiées en laboratoire.

Finalement, le piège à sédiment situé en aval du bac à sédiment permet d'obtenir un échantillon de la vase érodée. Le tableau II donne la taille moyenne des flocons lorsque ceux-ci sont observés.

	C=100 kg/m ³	C=160 kg/m ³	C=210 kg/m ³	C=260 kg/m ³	C=310 kg/m ³
Taille moyenne des flocons	inexistants	inexistants	inexistants	2 mm	2 à 4 mm

Tableau II.- Taille moyenne des flocons, observée en laboratoire.

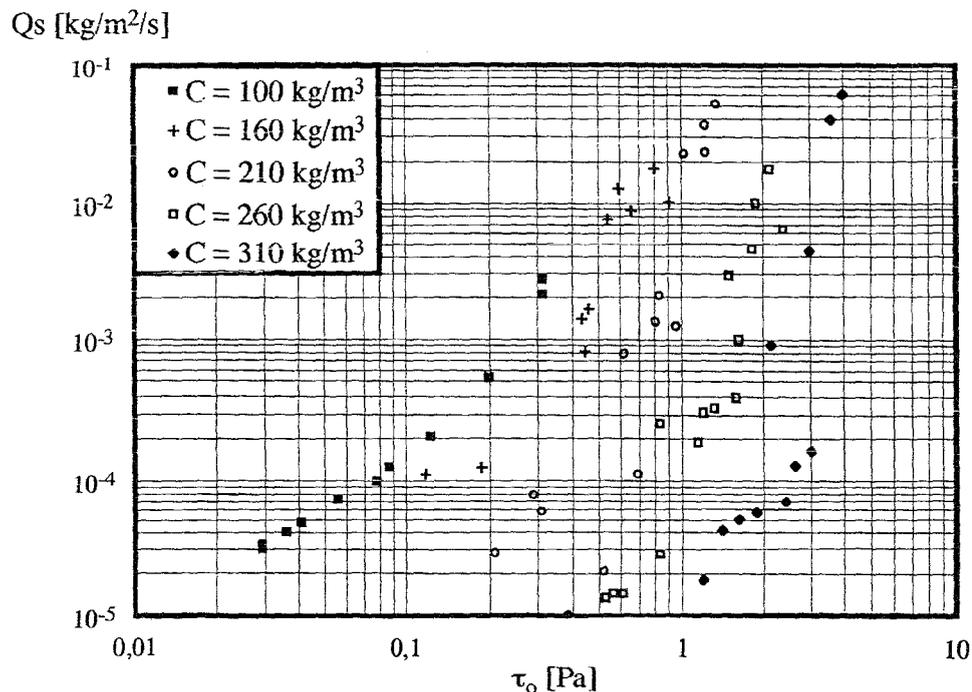


Figure 4.- Q_s en fonction de τ_o pour les 5 concentrations étudiées en laboratoire.

7. Conclusions

Cette étude montre qu'un système hydraulique confiné à circuit fermé permet d'étudier convenablement l'érosion des sédiments en laboratoire. En effet, un nombre réduit d'essais réalisés à l'aide d'un tel système construit dans le cadre de ce travail, montre que les conditions critiques de mise en mouvement des sables sont ici en accord avec la loi de Shields. Les principaux atouts de ce système sont : ses dimensions réduites, la faible quantité de matériau nécessaire aux essais, la large gamme des vitesses possibles et la simplicité de la mise en oeuvre des essais.

Ce travail confirme les observations issues d'une étude préalable (Hosseini, 1995) concernant la forte variabilité des valeurs de τ_y et c_u entre deux mesures successives réalisées sur une même vase (concentration fixe) en suivant un protocole de mesures rigoureux. Cette variabilité est également constatée pour les valeurs du taux d'érosion entre deux essais successifs lorsque l'on examine l'érosion d'une vase à concentration fixe sous l'action d'une contrainte hydrodynamique constante. Cette dernière variabilité serait liée d'une part, au comportement hétérogène de vases apparemment homogènes, et d'autre part, à la nature chaotique du début d'érosion qui se développe très rapidement aux environs des premiers points affectés par l'érosion.

Par ailleurs, lorsque l'on compare les valeurs moyennes de τ_y et c_u avec celles d'une étude préalable (Hosseini, 1995) mesurées sur une autre vase de Loire, on constate que celles-ci peuvent varier dans un rapport de 1 à 10 pour une même concentration. Ceci montre la grande variété de vases que l'on peut rencontrer dans un estuaire selon le site et la date du prélèvement.

Les résultats de cette étude montrent donc, que les valeurs à concentration constante de Q_s en fonction de τ_o , de c_w , et de τ_y , pour une vase d'estuaire donnée, ne peuvent avoir de signification que statistiquement.

Enfin, cette étude montre que le tassement joue un rôle aussi important que la floculation (voire plus important) sur la taille et la rigidité des floccs en suspension dans les estuaires. En effet, lorsque les vases plastiques sont érodées, des copeaux de vase à forte rigidité sont arrachés et ceux-ci ne se diluent dans l'eau que très difficilement. Ceci explique en partie la présence des floccs observée par Pauc (1980) en amont des estuaires, par le fait que les matériaux fins en suspension sont issus du lessivage des sols à forte cohésion.

8. Références bibliographiques

- Berthois, L., Étude de la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Loire, 4ème Congrès int. portuaire, Anvers, 1ère partie, 1964, pp 32-41.
- CSEEL, Publications du Centre National pour l'Exploitation des Océans, Rapports Scientifiques et Techniques n° 55, 1984, 160 p.
- Hosseini, K., "Conditions critiques d'érosion des vases molles", mémoire de DEA de Université de Nantes, 1995, 48 p.
- Migniot, C., "Tassement et rhéologie des vases", La Houille Blanche, n° 1 et 2, 1989, pp 11-29 et 95-111.
- Partheniades, E., "Erosion and deposition of cohesive soils", ASCE, Journal of the Hydraulic Division, Vol. 91, n° HY1, January, 1965, pp 105-139.
- Périgaud, C., "Mécanique de l'érosion des vases", La Houille Blanche, n° 7/8, 1983, pp 501-512.
- Pauc, H., "Floculation et potentiel de surface des matériaux en suspension en environnement d'embouchure", CRAS, t 290, série B, 1980, pp 175-178.