

Erosion d'une vase de l'estuaire de la Loire sous l'action du courant

Erosion of a mud from the Loire estuary by a flow

M. Sanchez · D. Levacher

Received: 8 June 2007 / Accepted: 14 April 2008 / Published online: 4 June 2008
© Springer-Verlag 2008

Résumé Le phénomène d'érosion des vases sous l'action d'un courant est abordé expérimentalement. Cette étude comporte six séries d'essais d'érosion réalisées en laboratoire sur une vase de Loire pour six concentrations différentes. Pour chaque concentration, trois essais successifs ont été effectués afin de pouvoir analyser les résultats statistiquement. La rigidité initiale et la concentration des vases sont mesurées en suivant un protocole d'essai. Des lois phénoménologiques sont proposées pour relier le taux d'érosion mesuré à la rigidité initiale du sédiment et à la contrainte hydrodynamique. Un piège à sédiments intégré dans le dispositif d'essai, permet d'obtenir un échantillon de matériau érodé. La taille des copeaux de vase érodés et leur densité sont mesurées grâce à une technique expérimentale originale. Une expression mathématique est ainsi avancée pour relier la taille des copeaux à la densité et à la rigidité initiale du dépôt dont ils proviennent.

Mots clés Erosion · Vase · Rhéologie · Modélisation physique · Loire

Abstract This research work deals with an experimental study on the erosion phenomenon of a mud under the action of a water current. It is observed from research works

carried out by Partheniades (J Hydraul Div ASCE 91(HY1):105–139, 1965), Migniot (La Houille Blanche 1&2:11–29, 95–111, 1989), Ockenden and Delo (GeoMar Lett 11:138–142, 1991), Aberle et al. (Mar Geol 207:83–93, 2004), among others, that mud erosion process by an hydrodynamic action depends mainly on sediment properties. Based on a literature study, this critical stress is assumed to be proportional either to the effective cohesion (Eq. 2) or to the yield stress (Eq. 4) of the sediment bed. Six erosion test series have been performed at six different concentrations of a mud from the Loire estuary. Some properties of the tested sediments are: a solid particles density $\rho_s = 2,550 \text{ kg m}^{-3}$, a liquidity and plasticity limit at 140 and 70% of the water content, respectively, a mean size of the dispersed mineral fraction determined by laser techniques of $10 \mu\text{m}$, and a volatile matters content of 11.86% by total dry weight burned at 550°C . As the rheological behaviour is difficult to describe, the sediment strength is characterized by only a parameter, namely, the yield stress τ_y . It is measured with a coaxial cylinder Brookfield LVT viscosimeter following a defined procedure (Hosseini in Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion non drainée dans les vases molles—Relation avec la dynamique sédimentaire. Thèse, Université de Nantes, 167 p, 1999). For each studied concentration, three successive erosion tests are carried out, and for every erosion test, 15 successive measurements of τ_y are made. The mean values and the standard deviations of τ_y are shown in Table 1 as a function of the bed sediment concentration C . A confined flume has been conceived and built to characterize the erosion rates. With this device, a current-induced shear stress is generated above an homogeneous deposited sediment (Fig. 1). The bed shear stress τ_o is calculated from the measured mean velocity V by Eq. 5. The friction coefficient c_f involved in Eq. 5 has been evaluated

M. Sanchez (✉)
Faculté des Sciences et des Techniques, UMR 6112 CNRS,
Laboratoire de Planétologie et Géodynamique,
Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière,
BP 92208, 44322 Nantes, France
e-mail: martin.sanchez@univ-nantes.fr

D. Levacher
Faculté des Sciences, UMR 6143 CNRS, Morphodynamique
Continentele et Côtière, Université de Caen,
Esplanade de la Paix, 14032 Caen, France

from measurements of the hydraulic pressure loss. Finally, the validity of Eq. 5 has been confirmed by five calibration tests on the incipient of the movement of sands for which results are compared with Shields diagram in Fig. 2. The observed erosion mechanisms affecting cohesive sediments depend mainly on the value of the yield stress. For a fluid mud (τ_y less than 3 N m^{-2}), the bed shear stress produces at first a wavy motion on the bed surface with a progressive undulation. When the shear stress increases, resuspension produces a diluted sediment cloud which is entrained and dispersed by the flow. For a plastic mud (τ_y greater than 3 N m^{-2}), erosion occurs by a wrenching of aggregates which are transported near the bottom. Initially, the eroded aggregates measure several millimetres in size; but, once transported, aggregates break into very rigid and compact aggregates of maximum size close to 1 mm in all the cases. During erosion tests, erosion volumetric rates E_v have been evaluated under steady-state bed shear stress τ_o from the observed variation in time of suspended sediment concentration. A generalized erosion is assumed for $E_v \geq E_{v0} = 3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (that is the equivalent of 1 mm sediment layer eroded per hour). The generalized erosion occurs above a critical bed shear stress τ_{oe} which is linked to τ_y and mud density through Eq. 7. A phenomenological law defined by Eq. 8 is proposed to calculate the erosion rate as a function of yield stress and hydrodynamic shear stress at the bottom. For $\tau_o < \tau_{oe}$, a small erosion is observed, which is described by a formulation given by Cerco et al. (Water quality model of Florida Bay. U.S. Army Engineer Research and Development Center, ERDC/EL TR-00-10, Vicksburg, USA, 260 p, 2000). Above τ_{oe} , a small increase in τ_o produces an important erosion rate rise which is described by a formulation suggested by Mehta and Partheniades (Resuspension of deposited cohesive sediment beds. In: Proceedings of the 18th coastal engineering conference, Cape Town, South Africa, 2:1569–1588, 1982). Figure 3 shows as a function of τ_o the observed values of E_v (discrete symbols) as well as the proposed model (in solid lines) for the six concentrations. For the theoretically maximum value of E_v , the hydrodynamic shear stress is very high with regard to the sediment cohesion; and then, the water flux produces an entrainment of underlying fluid mud layers. The asymptotic law obtained from the model of Kranenburg and Winterwerp (1997) plotted in dashed lines in Fig. 3, is expressed by $E_v = 0.3 u_*$. A sediment trap inserted in the experimental system allows a sample of eroded mud aggregates to be obtained. It is observed that the maximum value of the diameter D_M of the eroded aggregates depends on the density and yield stress of the initially deposited mud according to Eq. 10. In the same way, the density of the aggregates issued from plastic mud erosion is measured following an original experimental method and procedure (Table 3). The erosion of plastic

muds with a concentration from 310 to 420 kg m^{-3} produces aggregates with a concentration close to 400 kg m^{-3} and yield stress a little greater than 100 N m^{-2} .

Keywords Erosion · Mud · Rheology · Physical modelling · Loire River

Introduction

Des vases organiques fluides de type crème de vase à très faible cohésion couvrent les fonds de nombreux estuaires et baies côtières abritées de la houle océanique. Ces sédiments sont susceptibles de se remettre en suspension sous l'action d'agents hydrodynamiques tels que les courants et les vagues engendrées par le vent. La remise en suspension des sédiments est à l'origine de la formation des zones de très forte turbidité des eaux, connues dans les estuaires sous le nom de bouchon vaseux. Les fortes turbidités d'une part posent un problème de qualité de l'eau, et d'autre part, sont responsables du très fort taux d'envasement de certains ports, pouvant atteindre dans des cas extrêmes jusqu'à 1 m d'épaisseur en 15 jours.

Dans l'estuaire de la Loire, la vase prédomine dans le chenal de l'estuaire en aval de Nantes, tandis qu'en amont de ce site, les fonds sont recouverts principalement de sable. Dans cet estuaire, un bouchon vaseux se met en place à la suite d'une érosion très importante de vases fluides, phénomène observé principalement lorsque les courants de marée deviennent importants en vives-eaux (Sanchez et al. 2000).

Cet article concerne précisément l'étude en laboratoire de l'érosion de vases de Loire à forte teneur en eau. C'est en fait le principal mécanisme sédimentaire à l'origine de la formation des zones à forte turbidité souvent observées dans cet estuaire pendant les marées de vives-eaux.

Les études les plus anciennes portant sur les conditions critiques d'érosion de sédiments par un courant étaient réalisées sur des sables. Dans ces études, l'écoulement était caractérisé exclusivement par la vitesse moyenne V . C'est ainsi qu'en 1753, Brahmans (*dans* Larras 1972) a proposé une loi non homogène où la vitesse critique d'érosion V_c est proportionnelle à la puissance 1/6 du poids individuel des granulats.

Cependant, il a été noté par la suite que la vitesse critique d'érosion dépendait également d'autres paramètres comme le tirant d'eau et la rugosité des fonds.

C'est pourquoi, pour un certain type de granulats, la «force» générée par le courant susceptible de provoquer le début d'entraînement, est paramétrée par une valeur critique τ_{oc} de la contrainte de cisaillement au fond τ_o , telle que celle-ci figure dans les théories modernes de l'écoulement turbulent. Cette représentation est aujourd'hui

couramment utilisée en transport solide (Shields 1936; Einstein 1942; Meyer-Peter et Müller 1948; Larras 1972).

Le problème de la mise en mouvement des matériaux non cohésifs a été abordé d'une façon théorique et expérimentale par Shields (1936). En étudiant l'équilibre entre la force tractrice de l'écoulement, considérée comme proportionnelle à τ_o , et la résistance au mouvement, considérée comme proportionnelle au poids déjaugé des granulats, Shields a proposé une expression pour la contrainte de cisaillement critique d'érosion τ_{oc} qui est encore très utilisée de nos jours. Cette expression est la suivante:

$$\tau_{oc} = f(R_*)(\rho_s - \rho_w)gd \quad (1)$$

où ρ_s est la masse volumique des granulats, ρ_w la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur, d le diamètre des granulats et f un coefficient dépendant du nombre de Reynolds R_* .

De la même manière, les premières études sur l'érosion des matériaux cohésifs tenaient compte de la vitesse moyenne de l'écoulement (Hjulström 1935), alors que les études récentes caractérisent la «force» générée par le courant par τ_o . Des expériences réalisées par Migniot (1968) ont montré que la contrainte de cisaillement critique d'érosion d'une vase donnée s'élève fortement lorsque sa concentration C augmente à la suite du processus de tassement (voir aussi Sanchez et Levacher 2007). Cependant, les lois reliant τ_{oc} à C varient considérablement d'un matériau à un autre.

Pour établir une loi universelle de début d'érosion des vases, le problème est abordé d'une manière théorique. Pour ce faire, il est important de connaître une grandeur caractérisant le mieux possible la résistance des sédiments. C'est ainsi qu'en utilisant la cohésion effective c' (résistance au cisaillement indépendante du frottement intergranulaire selon la loi de Coulomb) pour caractériser cette résistance, Partheniades (1965) aboutit à la loi suivante :

$$\tau_{oc} = kc' \quad (2)$$

où k est un coefficient de proportionnalité sans dimension. Malheureusement Partheniades ne fournit pas de renseignements concernant la valeur du coefficient k .

Le début de l'érosion a été étudié d'une façon plus approfondie par Migniot (1989). Dans ses études, Migniot caractérise l'action de l'écoulement par la vitesse de cisaillement u_* , définie par $(\tau_o/\rho_w)^{0.5}$. En examinant en laboratoire plus de 30 matériaux cohésifs d'origines diverses, Migniot propose les formules suivantes:

$$u_{*c} = \begin{cases} 0,013\tau_y^{0,25}, & \text{si : } \tau_y \leq 3N\text{ m}^{-2} \text{ (vases fluides)} \\ 0,009\tau_y^{0,50}, & \text{si : } \tau_y > 3N\text{ m}^{-2} \text{ (vases plastiques)} \end{cases} \quad (3)$$

où u_{*c} est la vitesse de cisaillement critique d'érosion en m s^{-1} , et τ_y la rigidité initiale du sédiment en N m^{-2} . Cette

rigidité initiale est mesurée à l'aide d'un viscosimètre Brookfield LVT, en suivant un protocole d'essai bien défini (Migniot 1989). Sachant que la masse volumique de l'eau vaut environ $1,000\text{ kg m}^{-3}$, la loi de début d'érosion des vases plastiques proposée par Migniot peut être mise sous la forme suivante:

$$\tau_{oc} = 0,081\tau_y \quad (4)$$

Cette loi est donc semblable à celle de Partheniades, car c' et τ_y sont des valeurs seuil analogues ne différant entre elles que par le modèle rhéologique utilisé pour représenter le comportement des sédiments, une fois qu'elles sont dépassées. Si la contrainte appliquée dépasse la cohésion effective le comportement est solide. Si elle dépasse la rigidité initiale, le comportement est fluide. La valeur k du modèle de Partheniades (Eq. 2) serait donc de 0,081 si le protocole expérimental et le modèle rhéologique utilisés par Migniot étaient retenus.

Les études de Migniot et de Partheniades montrent l'importance jouée par le comportement rhéologique des vases dans l'étude du processus d'érosion. Or, à température constante, ce comportement, est très variable d'un sédiment à un autre selon leurs composants : taille des particules élémentaires, minéraux argileux, matière organique, débris d'organismes, oxydes divers, métaux, eau interstitielle, etc. Ainsi, à concentration constante, la rigidité initiale d'une vase est d'autant plus élevée que la fraction argileuse est fine ou que la matière organique est oxydée ; la salinité de l'eau interstitielle est ici un paramètre secondaire (Migniot 1989). Par ailleurs, la rigidité diminue lorsque la vase est remaniée, mais cette rigidité est récupérée par thixotropie après un certain temps de repos.

Une étude comparative portant sur plusieurs dispositifs expérimentaux pour étudier l'érosion en laboratoire et in situ (Tolhurst et al. 2000), montre que les valeurs observées de τ_{oc} dépendent du critère retenu pour définir le début d'érosion; plusieurs valeurs critiques de τ_o peuvent ainsi être définies, correspondant chacune à une valeur seuil du taux d'érosion.

Pour un sédiment donné, les études de Migniot (1989), Delo et Ockenden (1992), Berlamont et al. (1993), Aberle et al. (2004) et Krishnappan et Droppo (2006), montrent que le comportement dépend principalement de la concentration en matières sèches C . C'est pour cette raison qu'un grand nombre d'études suggère que le taux d'érosion d'une vase dépend de sa concentration et de la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement (Partheniades 1965; Cormault 1971; Mehta et Partheniades 1982; Parchure et Mehta 1985; Migniot 1989; Ockenden et Delo 1991; Houwing 1999). Cependant les lois proposées pour le taux d'érosion sont très variables selon la vase étudiée.

Matériels et méthodes expérimentales

Comportement rhéologique et mécanique de la vase

Les vases étudiées ont été prélevées au port de Trentemoult qui est situé dans l'estuaire de la Loire à 55 km de l'embouchure. Un échantillon d'une vase superficielle fraîchement déposée ayant une concentration in situ de 310 kg m^{-3} et un échantillon d'une vase partiellement consolidée ayant une concentration in situ de 420 kg m^{-3} , ont permis d'effectuer les essais d'érosion. Les autres essais ont été effectués avec des échantillons reconstitués en mélangeant la vase de 310 kg m^{-3} avec de l'eau du robinet.

La composition de la phase solide des deux échantillons prélevés in situ est semblable. La masse volumique de la fraction solide mesurée au pycnomètre est de $2,550 \text{ kg m}^{-3}$. Les limites d'Atterberg ont été déterminées, à savoir :

- limite de liquidité : $w_L = 140\%$,
- limite de plasticité : $w_P = 70\%$.

Mesurée par granulométrie Laser, la taille moyenne des particules constituant le cortège argileux est d'environ $10 \mu\text{m}$ et la teneur en matière organique volatile mesurée par calcination à 550°C pendant deux heures est de $11,86\%$.

Le comportement mécanique de la vase est caractérisé par la rigidité initiale de la vase τ_y , évaluée en utilisant un rhéomètre de type Brookfield LVT. Le principe est de mesurer le moment de torsion nécessaire pour mettre en rotation un cylindre immergé dans un matériau. Les mesures sont réalisées en suivant un protocole bien défini (Migniot 1989; Hosseini 1999).

Les expériences d'érosion en laboratoire ont été réalisées pour six concentrations différentes: 100, 160, 210, 260, 310, et 420 kg m^{-3} . Pour chaque concentration trois essais d'érosion sont effectués; chaque essai comportant 15 mesures de τ_y . Le Tableau 1 résume les résultats des mesures de la rigidité initiale et de ses coefficients de variation en fonction de la concentration. Notons qu'un essai d'érosion complémentaire de longue durée a été effectué sur une vase ayant une concentration de 390 kg m^{-3} et une rigidité initiale de 126 N m^{-2} afin d'étudier les taux d'érosion induits par des faibles valeurs de τ_o .

Dispositif expérimental utilisé pour l'étude de 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 Fig. 1, comporte une pompe, une veine d'essai de section rectangulaire, un débitmètre, deux

vannes, un réservoir de régulation, deux transitions section circulaire-rectangulaire. Les liaisons entre les différents éléments du système sont assurées par des conduites en PVC à section circulaire.

Compte tenu de l'espace réduit disponible en laboratoire et de la large gamme de vitesses à étudier, la solution retenue consiste en une veine d'essai confinée dans laquelle l'eau ne présente pas de surface libre. Les dimensions de la veine d'essai sont: $0,12 \text{ m}$ de largeur; $0,05 \text{ m}$ de hauteur et 2 m de longueur. Un bac à sédiments est situé au milieu de la veine d'essai où l'écoulement est en principe le plus uniforme. Les dimensions de ce bac sont: 1 m de longueur; $0,05 \text{ m}$ de profondeur, et, afin d'éviter les phénomènes de bord, la largeur est limitée à $0,08 \text{ m}$.

En aval du bac à sédiments, un piège à sédiments a été mis en place afin de récupérer les copeaux de vase lorsque l'érosion se produit par arrachement de ceux-ci, et ainsi de pouvoir mesurer leur taille et leur densité. La contrainte de cisaillement au fond est calculée en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement V , grâce à l'équation qui suit :

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

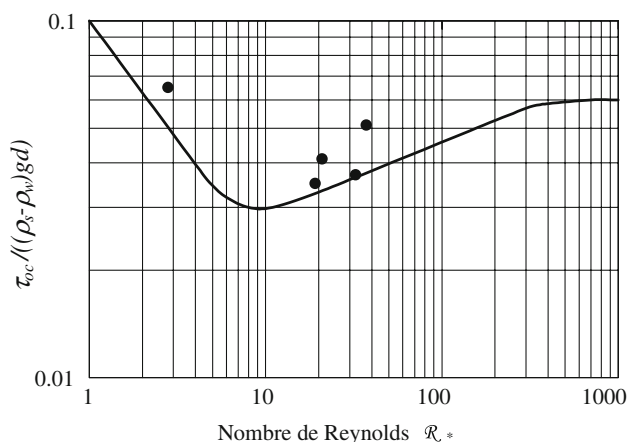
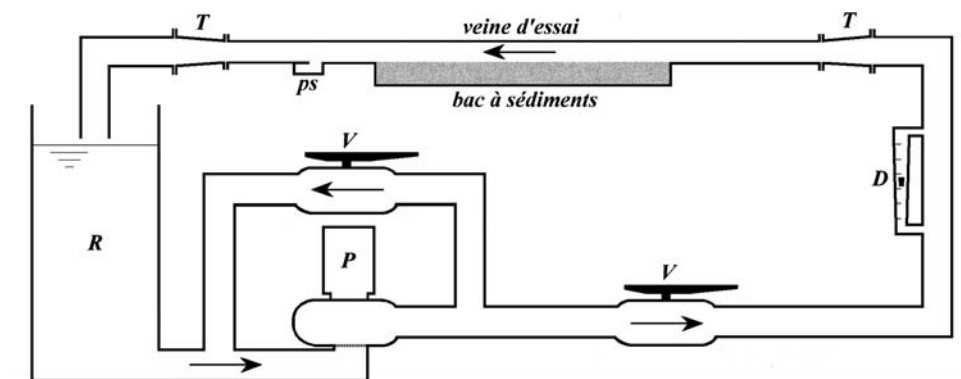
où c_f est un coefficient de frottement. Dans cette étude, la valeur retenue pour l'ensemble des concentrations étudiées est $c_f = 0,014$. Cette valeur a été déduite de la différence de charge hydraulique mesurée entre l'amont et l'aval du bac à sédiments. Elle correspond à une rugosité hydraulique ε de la surface de la vase de $8,7 \times 10^{-4} \text{ m}$.

Dans le but de valider le dispositif expérimental d'érosion, les contraintes de cisaillement au fond associées à la mise en mouvement de cinq sables différents ont été mesurées. Les sables étudiés sont un sable de Fontainebleau ($d = 2,0 \times 10^{-4} \text{ m}$), deux sables de Hostun ($d = 8,7 \times 10^{-4} \text{ m}$ et $d = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}$) et deux sables de Loire ($d = 8,7 \times 10^{-4} \text{ m}$ et $d = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}$). Le critère retenu de début de mouvement, correspond à un écoulement entraînant un mouvement généralisé de particules de sable en surface pour lequel un observateur ne peut pas distinguer individuellement chacune des particules en mouvement. Ces mesures sont comparées avec la loi de Shields dans la Fig. 2. Les valeurs obtenues pour τ_{oc} sont en moyenne 20% supérieures de celles calculées avec la loi de Shields. Ce faible écart donne l'ordre de grandeur de l'incertitude liée aux instruments utilisés dans cette étude.

Ces essais avec du sable ont également permis de constater que le mouvement du sable se produit uniformément sur toute la surface du bac à sédiments. Ceci confirme 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 .

Tableau 1 Mesures de τ_y (en N m^{-2}) correspondant à la vase de Loire étudiée en laboratoire

	Concentration					
	100 kg m^{-3}	160 kg m^{-3}	210 kg m^{-3}	260 kg m^{-3}	310 kg m^{-3}	420 kg m^{-3}
Moyenne	0,73	1,18	5,26	20,3	55,0	141
Coefficient de variation de τ_y	0,15	0,14	0,17	0,25	0,30	0,21

Fig. 1 Schéma du système expérimental d'essais d'érosion en laboratoire. Légende: *P* pompe, *V* vanne, *R* réservoir, *D* débitmètre, *T* transition, *ps* piège à sédiments**Fig. 2** Courbe de Shields pour le début d'érosion des sables et points expérimentaux issus des essais avec du sable

Résultats

Essais d'érosion de vases

Six séries d'essais d'érosion sont réalisées pour les six concentrations différentes. Pour chaque concentration, trois essais successifs sont effectués afin de pouvoir examiner les résultats statistiquement. Le fluide utilisé est l'eau du robinet à une température moyenne de 21°C .

Après la mise en place de la vase dans le bac à sédiments une couche d'environ 1 mm déborde. Elle est décapée en striant la surface à l'aide d'une grille métallique et en utilisant un contre-courant pour la chasser. Ceci ne peut pas s'opérer pour les concentrations de 100 et 160 kg m^{-3} , car la crème de vase est alors trop liquide. Grâce à ce mode

opérateur la surface de la vase au début des tests n'est pas parfaitement lisse. Dans ces conditions, la rugosité hydraulique initiale, d'environ $8,7 \times 10^{-4} \text{ m}$, se traduit par une valeur locale du coefficient de Strickler de $68 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, valeur qui correspond tout à fait à des surfaces de type vase.

Les essais sont réalisés en augmentant graduellement les vitesses par paliers. En début d'essai, chaque palier dure cinq minutes et si l'érosion n'est pas observée, la vitesse est augmentée. Ensuite, dès lors qu'un début d'érosion est observé, la vitesse est maintenue constante pendant 30 min. Par la suite, la vitesse est à nouveau augmentée et la durée de chaque palier est de plus en plus courte, mais cette durée est suffisante pour déceler visuellement une nette augmentation de la turbidité. L'essai est arrêté lorsque la couche de sédiments est érodée sur plus de 2 mm d'épaisseur. A chaque palier, la vitesse V est mesurée afin de calculer la valeur de τ_o . De plus, les teneurs en matières en suspension en début et en fin du palier sont mesurées sur des échantillons prélevés en aval du bac à sédiments afin d'évaluer le taux volumique d'érosion E_v comme suit:

$$E_v = \frac{\vartheta}{AC} \frac{\Delta \text{MES}}{\Delta t} \quad (6)$$

où ϑ est le volume total d'eau dans le système, A la surface horizontale du bac à sédiments, C la concentration de la vase déposée dans le bac et ΔMES l'accroissement de la teneur en matières en suspension au cours de la durée Δt du palier.

Les mécanismes de l'érosion observés en laboratoire sont très différents suivant l'état des dépôts de vase. Pour les sédiments peu concentrés (vases fluides), l'érosion se produit par bouffées, une ondulation apparaît 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). Ce mécanisme est observé lors des essais réalisés sur les vases de Loire pour des concentrations de 100 et de 160 kg m⁻³.

Pour les sédiments très concentrés (vases plastiques), l'érosion se manifeste par l'arrachement de petits copeaux de matériau (Périgaud 1983). Ces copeaux de matériau se désagrègent très difficilement et sont transportés sous forme de galets de faible masse volumique mais de forte cohésion. Dans la plupart des cas, l'érosion prend naissance à partir d'un point préférentiel (particules de sable, puits de drainage, etc.). Cette forme d'érosion est observée pour les vases de Loire ayant une concentration supérieure ou égale à 210 kg m⁻³.

Lors de l'essai d'érosion complémentaire de longue durée, un faible taux volumique d'érosion de 7×10^{-10} m s⁻¹ a été observé sur 24 heures sous conditions hydrodynamiques caractérisées par une valeur de τ_o de 1,48 N m⁻², alors que selon la loi d'érosion de Migniot (Eq. 4) la contrainte de cisaillement critique d'érosion vaut 10,2 N m⁻². Ce test d'érosion de longue durée confirme la validité d'une formulation proposée par Cerco et al. (2000) selon laquelle les contraintes hydrodynamiques s'accompagnent toujours d'une érosion, bien que dans certains cas celle-ci est tellement faible, que plusieurs heures ou journées sont nécessaires afin de pouvoir la quantifier.

De façon à définir l'ordre de grandeur des valeurs maximales de τ_o ayant un intérêt pratique in situ, il est important de signaler que dans l'estuaire de la Loire en dehors des crues, la vitesse débitante maximale, qui est de l'ordre de 2 m s⁻¹, est associée à une contrainte de cisaillement au fond voisine de 4 N m⁻². Cette contrainte de cisaillement n'est pas suffisante pour éroder d'une façon significative une vase de $C = 420$ kg m⁻³; mais elle est susceptible d'éroder une vase de $C = 310$ kg m⁻³ avec un taux d'érosion de l'ordre de 1×10^{-5} m s⁻¹ (soit une érosion d'une couche de sédiments de 0,86 m en 24 heures) et une vase de $C = 260$ kg m⁻³ avec un taux d'érosion supérieur à 0,001 m s⁻¹. Cette même contrainte de cisaillement éroderait une couche de vase fluide de $C < 260$ kg m⁻³ presque instantanément.

Loi d'érosion pour la vase de Loire

Le taux volumique d'érosion E_v est calculé à l'aide de deux formulations complémentaires: avec la formulation de Cerco et al. (2000) pour les faibles taux d'érosion, et avec une formulation suggérée par Mehta et Partheniades (1982) pour les taux d'érosion élevés. Sur la base d'observations expérimentales, le raccordement de ces deux formulations se fait pour une valeur seuil E_{vo} du taux volumique

d'érosion de 3×10^{-7} m s⁻¹ (ce qui représente une érosion d'une couche de sédiment de 1 mm par heure). Dans ces conditions, six valeurs expérimentales d'une contrainte de cisaillement critique τ_{oe} pour laquelle $E_v = E_{vo}$, ont été obtenues. La valeur de τ_{oe} est rattachée à la rigidité initiale τ_y et à la masse volumique de la vase ρ à travers l'équation homogène qui suit:

$$\tau_{oe} = c_1 \tau_y \left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \right)^{c_2} \quad (7)$$

Cette loi permet de définir les couches de vase érodables par une action prolongée du courant (de plusieurs jours). La loi du taux volumique d'érosion s'écrit comme suit :

$$E_v = \begin{cases} E_{vo} (\tau_o / \tau_{oe})^\alpha, & \text{si } \tau_o < \tau_{oe} \\ E_{vo} \exp[\alpha(\tau_o / \tau_{oe} - 1)], & \text{si } \tau_o \geq \tau_{oe} \end{cases} \quad (8)$$

Le paramètre α est rattaché à τ_{oe} par l'expression homogène suivante :

$$\alpha = c_3 \frac{\sqrt{\tau_{oe} / \rho_w} \varepsilon}{\nu} \quad (9)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'eau ($\sim 10^{-6}$ m² s⁻¹) et ε la rugosité hydraulique de la surface de la vase. Un ajustement non linéaire respectant le critère des moindres carrés a permis d'évaluer les constantes empiriques suivantes: $c_1 = 0,294$; $c_2 = 1,11$ et $c_3 = 0,114$.

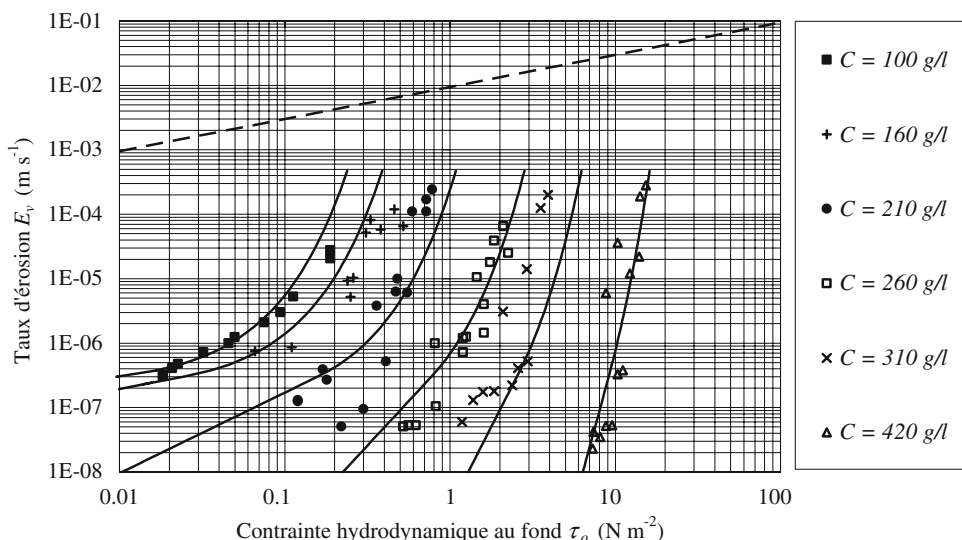
La Fig. 3 montre les points expérimentaux de E_v en fonction de τ_o , les six courbes ajustées pour le taux volumique d'érosion (en trait continu) et une loi asymptotique définissant le maximum possible de E_v en fonction de τ_o (en trait discontinu). Ce maximum correspond à une érosion par entraînement lorsque les sédiments du fond sont soumis à une forte contrainte hydrodynamique par rapport aux forces de cohésion. Dans ce cas, les tourbillons de l'écoulement pénètrent dans la couche de sédiments fluidifiée et sont ainsi directement responsables de la remise en suspension. La loi asymptotique déduite du modèle de Kranenburg et Winterwerp (1997) obéit à $E_v = 0,3 u_*$.

Il est montré que l'approche phénoménologique retenue pour décrire le taux volumique d'érosion fournit une loi pratique qui est valable tout au moins pour la vase de Loire. Dans cette approche la tenue des sédiments à l'érosion d'une part et l'action érosive de l'écoulement d'autre part, sont respectivement paramétrées à travers la rigidité initiale τ_y et la contrainte de cisaillement τ_o .

Diamètre, masse volumique et cohésion des copeaux de vase érodés

Le piège à sédiments situé en aval du bac à sédiments permet d'obtenir des échantillons de la vase érodée. Pour les échantillons de concentrations de 260 kg m⁻³ et

Fig. 3 Taux d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement au fond: valeurs expérimentales (en symboles), lois ajustées (en traits continus) et loi asymptotique déduite du modèle de Kranenburg et Winterwerp (1997) définissant le maximum possible de E_v en fonction de τ_o (en trait discontinu)



supérieures, les copeaux arrachés restent suffisamment individualisés pour pouvoir être analysés. La taille des copeaux immergés dans l'eau est mesurée avec un régle transparent collé à un verre de montre, qui, moyennant un support, est posé 1 cm au-dessus du copeau à mesurer.

Une étude des forces agissant au cours du processus d'érosion permet d'établir une relation théorique pour le calcul du diamètre maximum D_M des copeaux de vase érodés, qui s'écrit comme suit :

$$D_M \approx 0,16 \frac{\tau_y}{(\rho - \rho_w)g} \tag{10}$$

Cette relation, qui peut également être justifiée en utilisant le théorème d'analyse dimensionnelle Pi de Vaschy-Buckingham, s'accorde assez bien avec les valeurs de D_M données au Tableau 2 qui ont été mesurées sur les plus grands copeaux captés dans le piège à sédiments (Tableau 3).

Les copeaux de vase peuvent être cassés par l'écoulement après érosion. Ceci est observé notamment après l'érosion des sédiments à forte cohésion. En effet dans ce cas, les copeaux arrachés, aplatis et de taille importante, se cassent en roulant sur le fond.

Tableau 2 Diamètre maximum des copeaux D_M , mesuré en laboratoire et calculé par l'éq. 10

C (kg m ⁻³)	τ_y (N m ⁻²)	D_M (mm) (mesuré)	D_M (mm) (calculé)
100	0,73	non mesuré	0,20
160	1,18	non mesuré	0,21
210	5,26	non mesuré	0,67
260	20,3	2	2,1
310	55,0	4	4,8
420	141	10	9,0

Tableau 3 Masses volumiques et concentrations des copeaux érodés et des sédiments déposés

Sédiments déposés		Copeaux érodés	
ρ (kg m ⁻³)	C (kg m ⁻³)	ρ (kg m ⁻³)	C (kg m ⁻³)
1,188	310	de 1,228 à 1,243	de 375 à 400
1,255	420	de 1,243 à 1,260	de 400 à 429

Pour déterminer la masse volumique des copeaux de vase, 11 solutions de masses volumiques différentes ont été préparées, comprises entre 1,183 et 1,383 kg m⁻³, en diluant dans de l'eau des quantités variables de sel et de sucre. Ces liquides constituent des étalons de masse volumique. Un copeau de vase immergé dans l'eau est prélevé sans contact par aspiration dans un tube en verre de 5 mm de diamètre intérieur. Ce tube est placé en position verticale au-dessus d'une éprouvette remplie d'une solution liquide de densité connue. Le copeau ne descend dans le liquide de l'éprouvette que si sa densité est supérieure.

Des mesures de la masse volumique des copeaux issus de l'érosion des vases plastiques ont été effectuées pour deux concentrations différentes (Tableau 3). Pour une concentration de 420 kg m⁻³, la densité des copeaux est la même que celle de la vase déposée à la précision de la mesure près. Mais, pour une concentration de 310 kg m⁻³ la densité des copeaux est supérieure d'environ 20% à celle du dépôt.

Finalement, comme dans les deux cas décrits ci-dessus les copeaux de vase ont une concentration voisine de 400 kg m⁻³. Leurs rigidités initiales sont estimées à des valeurs légèrement supérieures à 100 N m⁻². Cette estimation de la rigidité initiale des copeaux se base sur les mesures effectuées sur les mélanges vase-eau dont les résultats sont présentés au Tableau 1.

Conclusions

A l'observation des résultats obtenus, 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 de vitesses possibles et la simplicité de la mise en oeuvre des essais.

Ce travail confirme la forte variabilité des valeurs de la rigidité initiale entre deux mesures successives réalisées sur une même vase à concentration fixe en suivant un protocole de mesure rigoureux (ce qui est caractérisé par les valeurs du coefficient de variation de τ_y , rassemblées au Tableau 1). Cette variabilité est également constatée pour les valeurs du taux d'érosion entre deux essais successifs lorsqu'une vase de concentration donnée est soumise à 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. Les résultats de cette étude démontrent donc que les valeurs à concentration constante de E_v , en fonction de $\tau_{o,c}$ et de τ_y , pour une vase d'estuaire donnée, ne peuvent avoir de signification que statistiquement.

Cette étude montre que le tassement et la mécanique d'arrachement du sédiment jouent un rôle aussi important, voire plus important, que la floculation sur la taille et la cohésion des copeaux en suspension dans les estuaires, lesquels sont généralement considérés être issus de la floculation des matières en suspension (flocons) qui se produit principalement lorsque l'eau est salée. En effet, lorsque les vases plastiques sont érodées, des copeaux de vase à forte cohésion et faible perméabilité sont arrachés et ceux-ci ne se désagrègent dans l'eau que très difficilement. Ceci explique en partie la présence d'agrégats en suspension observée par Pauc (1980) en amont des estuaires, par le fait que les matériaux fins en suspension sont issus de l'érosion des sols à forte cohésion.

La masse volumique des copeaux érodés est proche de celle de la vase déposée et sa taille augmente lorsque la cohésion de la vase augmente. Enfin, on peut avancer qu'après l'érosion, les copeaux conservent une cohésion du même ordre de grandeur que celle de la vase dont ils proviennent. Ces trois renseignements sur les copeaux (masse volumique, taille et cohésion) sont fondamentaux pour prévoir leur évolution en tant que matière en suspension,

car ils conditionnent leur vitesse de chute et leur résistance par rapport aux contraintes hydrodynamiques.

Références

- Aberle J, Nikora V, Walters R (2004) Effects of bed material properties on cohesive sediment erosion. *Mar Geol* 207:83–93. doi:10.1016/j.margeo.2004.03.012
- Berlamont J, Ockenden M, Toorman E, Winterwerp J (1993) The characterisation of cohesive sediment properties. *Coast Eng* 21:105–128. doi:10.1016/0378-3839(93)90047-C
- Cerco CF, Bunch BW, Teeter AM, Dortch MS (2000) Water quality model of Florida Bay. U.S. Army Engineer Research and Development Center, ERDC/EL TR–00-10, Vicksburg, USA, 260 p
- Cormault P (1971) Détermination expérimentale du débit solide d'érosion des sédiments fins. In: Proceedings of the 14th meeting IAHR, Paris
- Delo EA, Ockenden MC (1992) Estuarine muds manual. HR Wallingford report SR309, 23 p
- Einstein HA (1942) Formulas for the transportation of bed-loads. *Trans ASCE* 107:561–577
- Hjulström F (1935) Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by rivers Fyris, chap III. *Bull Geol Inst Uppsala* 25, pp 221–527
- Hosseini K (1999) Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion non drainée dans les vases molles—Relation avec la dynamique sédimentaire. Thèse, Université de Nantes, 167 p
- Houwing EJ (1999) Determination of the critical erosion threshold of cohesive sediments on intertidal mudflats along the Dutch Wadden sea coast. *Estuar Coast Shelf Sci* 49:545–555 doi:10.1006/ecss.1999.0518
- Kranenburg C, Winterwerp JC (1997) Erosion of fluid mud layers—I: entrainment model. *J Hydraul Eng* 123(6):504–511 doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:6(504)
- Krishnappan BG, Droppo IG (2006) Use of an in situ erosion flume for measuring stability of sediment deposits in Hamilton Harbour, Canada. *Water Air Soil Pollut Focus* 6:557–567 doi:10.1007/s11267-006-9039-0
- Larras J (1972) *Hydraulique et granulats*. Eyrolles, Paris, 254 p
- Mehta AJ, Partheniades E (1982) Resuspension of deposited cohesive sediment beds. In: Proceedings of the 18th coastal engineering conference, Cape Town, South Africa, 2:1569–1588
- Meyer Peter E, Müller R (1948) Formulas for bed-load transport. In: Proceedings of the 2nd meeting IAHR, Stockholm, pp 39–64
- 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, 2: 11–29, 95–111
- Ockenden MC, Delo EA (1991) Laboratory testing of muds. *Geomorphol Lett* 11:138–142. doi:10.1007/BF02430999
- Parchure TM, Mehta AJ (1985) Erosion of soft cohesive sediment deposits. *J Hydraul Eng* 111:1308–1326
- Partheniades E (1965) Erosion and deposition of cohesive soils. *J Hydraul Div ASCE* 91(HY1):105–139
- Pauc H (1980) Floculation et potentiel de surface des matériaux en suspension en environnement d'embouchure. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (B)* 290:175–178
- Périgaud C (1983) Mécanique de l'érosion des vases. *La Houille Blanche* 7/8:501–512
- Sanchez M, Grovel A, Hosseini K (2000) Impact sédimentaire des travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire. *Bull Eng Geol Environ* 59:239–246 doi:10.1007/s100640000047

- Sanchez M, Levacher D (2007) The influence of particle size of the dispersed mineral fraction on the settlement of marine and estuarine muds. *Geomar Lett* 27:303–313 doi:[10.1007/s00367-007-0053-7](https://doi.org/10.1007/s00367-007-0053-7)
- Shields A (1936) Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau* 26:5–24 (in German)
- Tolhurst TJ, Black KS, Paterson DM, Mitchener HJ, Termaat GR, Shayler SA (2000) A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments. *Continental Shelf Res* 20:1397–1418 doi:[10.1016/S0278-4343\(00\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00029-7)