



## Dispositif pour l'étude locale de l'érodabilité de sédiments modèles transparents

Keang Sè POUV<sup>1</sup>, Anthony BESQ<sup>1</sup>, Sylvain GUILLOU<sup>1</sup>

1. Université de Caen Basse-Normandie, LUSAC (EA 4253),  
Site Universitaire, BP 78, 50130 Cherbourg Octeville, France.

[keang-se.pouv@unicaen.fr](mailto:keang-se.pouv@unicaen.fr) ; [anthony.besq@unicaen.fr](mailto:anthony.besq@unicaen.fr) ; [sylvain.guillou@unicaen.fr](mailto:sylvain.guillou@unicaen.fr)

### Résumé :

Dans cet article, on dévoile un mini canal annulaire transparent développé pour aborder la problématique de l'érosion de sédiments. Ce dispositif de laboratoire est associé avec un système microscopique optique pour observer localement les caractéristiques du lit sédimentaire, et avec un banc PIV (Particle Image Velocimetry) pour mesurer le champ de vitesses du fluide d'entraînement. On détaille également une technique du suivi particulaire par imagerie (Particle Image Tracking) que l'on applique aux enregistrements en microscopie. On expose, en parallèle, quelques exemples de résultats et paramètres d'analyse dans le cas de deux fluides modèles transparents, plus précisément, un gel de carbopol et un gel mixte laponite-carbopol. On montre que les observations locales permettent de mieux comprendre les mécanismes d'érosion dans la mesure où l'on capture le phénomène dès sa naissance.

### Mots-clés :

Canal annulaire – Erosion – Sédiments modèles – PIV – Microscope – Suivi particulaire par imagerie

### 1. Introduction

Dans les ports et les estuaires, la dynamique de couches sédimentaires est très souvent remarquable. Le transport (ex. érosion) et le dépôt (ex. sédimentation) de sédiments cohésifs dus aux différents événements naturels (ex. marée) et activités humaines (ex. navigation) peuvent éventuellement faire évoluer la morphologie de ces espaces privilégiés au cours du temps. La meilleure gestion de ceux-ci dépend du niveau de compréhension de ces processus complexes au niveau du fond sédimentaire qui requiert une approche expérimentale. Dans ce but, divers instruments sont ainsi développés régulièrement pour les essais en laboratoire, sur site ou *in situ* (LE HIR *et al.*, 2006 ; WIDDOWS *et al.*, 2007). Il ressort de nombreux travaux (BLACK & PATERSON, 1997 ; TOLHURST *et al.*, 2000) que l'étude de ces processus, surtout le phénomène d'érosion avec un sédiment naturel, est compliquée car les résultats obtenus avec différents instruments (ex. en laboratoire et *in situ*) sont souvent incohérents. Cette variation peut être attribuée principalement à l'organisation de la structure des

sédiments naturels qui est fonction de l'histoire mécanique, des activités biologiques, et de la composition minéralogique (LUNDKVIST *et al.*, 2007).

En termes de méthodologie expérimentale, les mesures traditionnelles en érosion visent à caractériser globalement les concentrations de matières arrachées du lit (i.e. taux d'érosion). L'occurrence de l'arrachement, permettant de déterminer la contrainte d'érosion, se fait sur la base d'une quantité significative de matières mises en suspension. Toutefois, cette notion de "quantité significative" n'est pas clairement définie dans la littérature. Cela dit, il est possible d'identifier différentes valeurs de contrainte d'érosion (pour un même type de matériau) selon le critère et la formulation d'érosion retenus pour chaque étude (SANFORD, 2006 ; TOLHURST *et al.*, 2000). La capacité du sédiment à encaisser des efforts jusqu'à un certain seuil de rupture correspond à la caractéristique d'un matériau à seuil. Les études en rhéométrie de nombreux matériaux à seuil incluant les sédiments cohésifs naturels (COUSSOT *et al.*, 2002 ; MØLLER *et al.*, 2006 ; POUV *et al.*, 2012) suggèrent que ce comportement peut être décrit par le concept physique de transition solide-liquide où le matériau passe d'un état coincé à un état où l'écoulement se développe plus ou moins brutalement et de manière plus ou moins hétérogène. Dans ce cas, on constate que ce sont les premiers instants du phénomène qu'il convient de capturer à une échelle locale (avant même tout arrachement brutal). Une technique spécifique (ex. RMN, PIV, PTV, ...) doit ainsi être mise en œuvre pour être employée avec un instrument donné. POUV *et al.* (2012) ont proposé une telle démarche sur la base d'une technique optique nécessitant l'emploi de fluides transparents. Des matériaux modèles comme les gels de carbopol et de laponite-carbopol, qui présentent un comportement de transition plus ou moins brutal et similaire à celui de sédiments cohésifs naturels, ont alors été mis au point par ces mêmes auteurs. Dans cette contribution, on dévoile un mini canal annulaire, accouplé à un système de microscope optique ainsi qu'un système PIV (Particle Image Velocimetry), permettant d'examiner l'érodabilité du fond sédimentaire soumis à un champ d'écoulement hydrodynamique. On expose la technique du suivi particulaire par imagerie utilisée et les analyses associées qui servent à caractériser les phénomènes locaux au sein du fond sédimentaire. On illustre, en parallèle, quelques résultats dans le cas de deux matériaux modèles transparents cités précédemment.

## **2. Canal annulaire pour essais d'érosion**

### 2.1 Caractéristiques du canal

Les schémas détaillés du mini canal annulaire transparent (en PMMA) sont illustrés sur la figure 1. Ce canal s'obtient par assemblage d'un plan support de forme carrée (330 mm × 330 mm), d'un cylindre circulaire solide (diamètre de 229 mm) fixé coaxialement à l'intérieur d'un parallélépipède évidé d'un cylindre circulaire (diamètre de 299 mm), et un plateau d'entraînement rotatif s'appuyant sur le cylindre plein. Le

canal a ainsi une largeur de 35 mm, soit une surface de 30700 mm<sup>2</sup>. L'interface du plateau en contact avec le fluide d'entraînement est conique avec un angle de 22,68° par rapport au plan horizontal. Cette inclinaison de la paroi est choisie pour obtenir une vitesse de cisaillement constante du fluide d'entraînement dans le cas d'un régime laminaire ( $\dot{\gamma} = \Omega / \tan \alpha$ , où  $\Omega$  est la vitesse de rotation du plateau). La plus grande profondeur du fluide d'entraînement est de 62,5 mm. Le plan support est évidé annulairement sur une profondeur constante de 2 mm de manière à accueillir le substrat. Pour les exemples de résultats illustrés dans cet article, on emploie deux sédiments modèles (un gel de carbopol de masse volumique  $\rho=1223 \text{ kg/m}^3$  et un gel de laponite-carbopol de masse volumique  $\rho=1153 \text{ kg/m}^3$ ) comme substrats fluides et deux types de fluide d'entraînement (un mélange white spirit-huile de paraffine de viscosité  $\nu=7,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , et un mélange eau-glycérol de viscosité  $\nu=1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). La méthode de préparation et les caractéristiques des deux matériaux modèles utilisés ont déjà été présentées par POUV *et al.* (2012). Il importe de noter que ces échantillons sont immiscibles avec le mélange white spirit-huile de paraffine, mais miscibles avec le mélange eau-glycérol, ce qui modifie les conditions expérimentales pour les essais en érosion en permettant ou non les phénomènes de transfert à l'interface du fond.

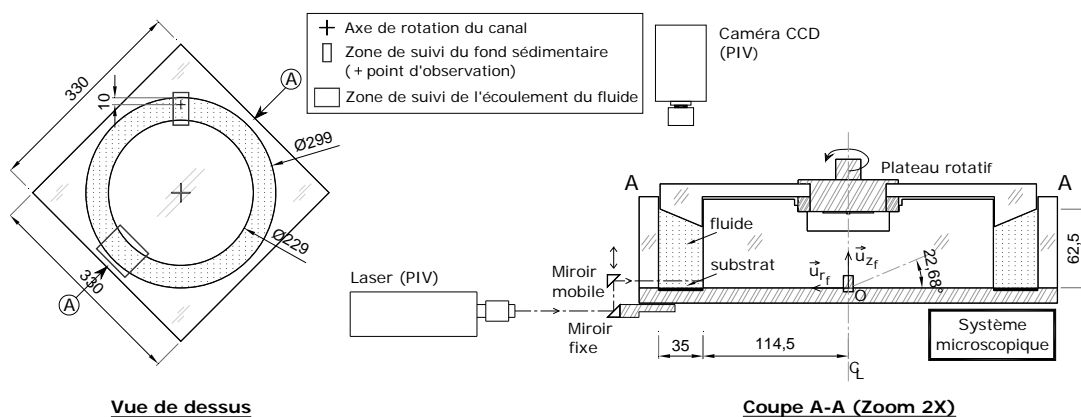


Figure 1. Schémas du canal (dimensions en mm) et de la configuration expérimentale.

## 2.2 Mise en œuvre

Afin de quantifier l'influence de l'étendue de la zone sédimentaire, il est possible de remplir totalement ou partiellement le domaine creusé du plan support avec un substrat fluide (sédiment). Pour ce dernier cas (étendue partielle), le support comporte une série de plaques lisses et pleines de 2 mm d'épaisseur dont une d'elles est évidée circulairement (diamètre de 22 mm) pour la mise en place du substrat fluide. Cette zone est bien évidemment placée à la verticale du point d'observation microscopique. Afin de limiter le glissement, un papier de verre est, par ailleurs, collé sur le plan support dans le cas où le substrat occupe tout le fond. L'échantillon déposé est pré-cisailé manuellement au moyen d'un plateau lisse avant de remplir complètement le canal avec

le fluide d'entraînement, et ce, de manière très précautionneuse pour ne pas perturber fortement l'échantillon. La phase de pré-cisaillement réalisée a pour but d'effacer l'histoire mécanique de l'échantillon et d'établir un état de référence.

Afin de mettre le plateau d'entraînement en rotation, on contrôle le couple imposé au moteur connecté au dispositif. Grâce à la forme circulaire du canal, un écoulement unidirectionnel ou de sens alterné (de vitesse constante, ou incrémentée par palier ou par rampe) est envisageable. Par exemple, la figure 2 illustre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation du plateau d'entraînement et du nombre de Reynolds dans le cas où l'on impose un couple constant. Pour chaque valeur du couple, la vitesse du plateau augmente d'abord très légèrement (phase laminaire,  $Re < 2000$ ), puis beaucoup plus progressivement (phase transitoire) avant de se stabiliser (phase turbulente établie). Les temps qui séparent les trois régimes d'écoulement semblent être quasiment identiques quel que soit le niveau du couple appliqué. Il faut noter que les champs de vitesses près du fond ne sont mesurés que lors de l'écoulement turbulent établi.

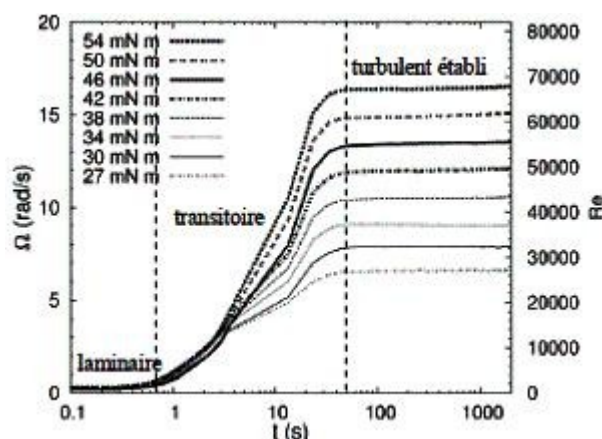


Figure 2. Evolution temporelle de la vitesse de rotation du plateau d'entraînement en fonction du couple appliqué.

### 2.3 Principe de mesure

Durant l'essai, le substrat est soumis à l'écoulement du fluide d'entraînement induit par le plateau rotatif (figure 1). Les champs de vitesses du fluide d'entraînement à proximité du fond sont mesurés à l'aide d'un système laser/caméra du banc PIV commercialisé par la société LAVISION. La nappe laser est positionnée horizontalement grâce au miroir mobile qui peut être translaté verticalement pour illuminer les couches minces du fluide tandis que la caméra CCD attachée à une potence est placée verticalement au-dessus du canal pour enregistrer les plans images (taille de 54 mm × 41 mm) à chaque pulsation. Les séries de paires d'images enregistrées permettent ensuite de calculer les champs de vitesses par inter-corrélation à l'aide du logiciel DAVIS. Les composantes de vitesses déterminées originellement en coordonnées cartésiennes ( $v_x$ ,  $v_y$ ) sont utilisées pour interpoler les vitesses ( $u_r$ ,  $u_\theta$ ) sur un maillage polaire régulier. Ce calcul

s'effectue au moyen d'une procédure écrite sous le logiciel Scilab et qui utilise les coordonnées du centre de rotation. La composante de vitesse  $u_\theta$  correspond à la direction principale de l'écoulement. Pour chaque plan de visualisation, il a été démontré qu'un nombre de 510 paires d'images (soit également 510 champs de vitesses instantanées) est suffisant pour déterminer le champ moyen en temps (ex. le champ illustré sur la figure 3a). Il faut souligner qu'il n'est pas possible de déterminer correctement la contrainte au fond ( $\tau_b = \mu(\partial u_\theta / \partial z_f)$ ) à partir du champ de vitesses  $u_\theta$  car la mise en œuvre expérimentale retenue ne permet pas d'obtenir une résolution suffisante selon la direction  $z_f$  dans la région de vitesses maximales ( $137 \text{ mm} < \text{rayon } r_f < 143 \text{ mm}$ ) qui est retenue pour réaliser les observations locales (figure 3b). Les valeurs du coefficient de frottement estimées sont de l'ordre de  $10^{-3}$  et diminuent selon une loi de puissance en fonction de Re.

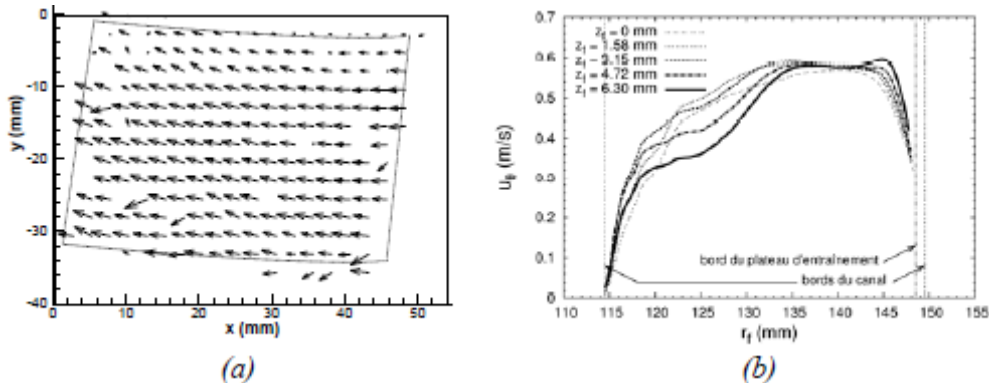


Figure 3. (a) Champ moyen (en temps) de vitesses pour le plan  $z_f=1,58 \text{ mm}$ , (b) champ de vitesses tangentielles (moyenne spatiotemporelle) d'un mélange white spirit-huile de paraffine au sein du canal annulaire (cas du substrat carbopol, étendue totale). Le paramètre  $z_f$  représente la hauteur de la nappe laser par rapport au fond.

Les phénomènes locaux au sein de la couche sédimentaire transparente sont caractérisés dans une zone loin de celle utilisée pour la mesure du champ hydrodynamique par PIV (figure 1). L'acquisition des images d'un volume d'échantillon (dimensions de l'ordre de  $764 \mu\text{m} \times 573 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ ) est effectuée au cours de l'essai grâce à la caméra CCD (objectif 5X, rapport d'agrandissement de  $1,193 \mu\text{m}/\text{px}$ ) du système microscopique qui s'installe au dessous du canal. Une technique du suivi particulière par imagerie qui sera détaillée dans le paragraphe suivant est développée pour exploiter ces images. Le domaine observable est radial et délimité par un plan vertical de longueur 14 mm et de hauteur approximative 1,8 mm (le côté supérieur est à une distance de 0,2 mm au dessous de la surface du fond sédimentaire). Il importe aussi de souligner qu'un étalonnage des paramètres géométriques (la position radiale  $r_0$  et la distance focale  $f_0$ ) de ce système optique est incontournable pour pouvoir connaître toutes les positions focalisées par rapport à un point de référence choisi (POUV *et al.*, 2009).

### 3. Techniques du suivi particulaire par imagerie et d'exploitation de données

#### 3.1 Marche particulaire

Afin d'obtenir les informations suffisantes de la marche particulaire, il importe que le matériau demeure présent au niveau du point de focalisation suffisamment longtemps pour que le suivi soit satisfaisant. C'est le cas si le matériau se déforme ou s'écoule très lentement avant que l'arrachement ne s'opère. Cette configuration est rencontrée s'il n'y a pas de transfert possible entre le sédiment et le fluide d'entraînement, ce qui est réalisable en utilisant deux matériaux non miscibles.

Grâce aux séries d'images acquises par le système microscopique, on est capable de suivre les mouvements (en 2D) temporels de traceurs particulaires (particules de mélamine de  $2,81 \mu\text{m}$  de diamètre) ensemencés au sein de l'échantillon. La présence des traceurs n'affecte pas les propriétés rhéologiques des gels étudiés (superposition des courbes d'écoulement). Les coordonnées temporelles des particules sont mesurées en utilisant le logiciel "ImageJ" et le module "Particle Detector & Tracker" (SBALZARINI & KOUMOUTSAKOS, 2005).

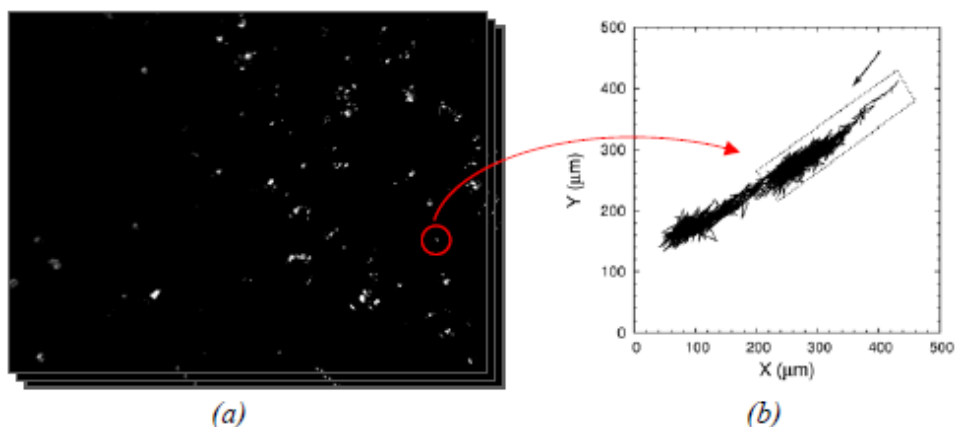


Figure 4. Principe du suivi particulaire par imagerie : (a) séries d'images obtenues au point  $r_f=139,5 \text{ mm}$ , (b) trajectoire d'une particule choisie (cas du substrat carbopol, étendue totale). Sur la figure (b), les données encadrées sont obtenues avec un taux d'enregistrement de 4 images/s pendant les premières 300 s puis de 0,1 image/s pour les 6000 s restantes). La flèche matérialise le sens principal de l'écoulement du fluide d'entraînement (mélange white spirit-huile de paraffine).

On a vérifié au préalable que les déplacements de particules observées simultanément dans le même champ image de cette taille ( $764 \mu\text{m} \times 573 \mu\text{m}$ ) sont généralement similaires. Il est ainsi suffisant de traiter les informations d'une seule particule choisie (figure 4). Pour les essais de longues durées, on raccorde la trajectoire d'une particule avec celle d'une autre particule dès que la première quitte le champ image. Cette procédure peut être répétée plusieurs fois selon le comportement de l'échantillon.

D'après la figure 4b, on observe d'abord un déplacement rapide et régulier de la particule dans le sens de l'écoulement, puis un déplacement toujours selon la même direction (et qui semble ralentir jusqu'à un état établi) avec en plus la superposition d'un déplacement aléatoire. Ces étapes de déplacement correspondent aux différents régimes d'écoulement rencontrés au cours de l'essai dès la mise en rotation du plateau. Le caractère aléatoire de la marche particulière peut être caractérisé à partir du paramètre déplacement instantané ( $d_i$ ) sachant que la fréquence d'échantillonnage fixée (cf. légende de la figure 4) résulte d'un compromis entre le temps d'expérience et l'espace mémoire. La figure 5 montre un exemple dans le cas de deux fluides modèles pour une même section d'érosion et une même condition d'entraînement. D'après la figure 5a, les valeurs de  $d_i$  sont en moyenne plus ou moins fortes et fluctuent plus ou moins selon les propriétés mécaniques de chaque matériau ainsi que les conditions hydrodynamiques près du fond (résultantes du couplage fond/écoulement). Les données statistiques de ces signaux peuvent être analysées, après une normalisation sous forme  $(d_i - \bar{d}_i) / \sigma_d$  (où  $\bar{d}_i$  et  $\sigma_d$  sont respectivement la moyenne et l'écart type des valeurs de  $d_i$ ), à l'aide d'un histogramme dénombrant les déplacements pour différentes classes de largeur 0,5 (figure 5b). On observe alors une même tendance qui traduit la présence d'une même dynamique particulière pour les deux essais. L'asymétrie de l'historgramme peut être liée au non respect du critère de Shannon car la dynamique aléatoire de la particule reste rapide devant la capacité d'échantillonnage de notre caméra. Il faut également prendre en compte que deux fréquences ont été utilisées par test. Des essais complémentaires doivent être conduits dans ce sens.

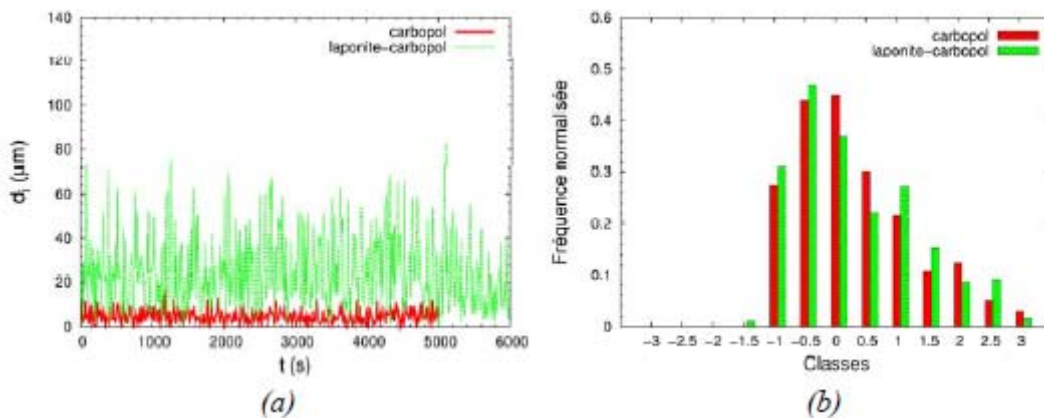


Figure 5. (a) Evolution temporelle du déplacement instantané, (b) répartition normalisée du déplacement instantané. Cas du gel de carbopol et du gel mixte laponite-carbopol avec une même étendue totale.

La marche particulière peut être exploitée également à l'aide du déplacement temporel  $\Delta r$  de la particule par rapport à sa position initiale. On ne retient que les événements tels que  $\Delta r(t_i) > \Delta r(t_{i-1})$  pour s'affranchir du déplacement aléatoire qui se superpose à

l'évolution de fond beaucoup plus lente. La figure 6 présente les résultats dans le cas où l'échantillon occupe une section réduite du fond du canal (étendue partielle). Pour les deux matériaux utilisés, on obtient un comportement similaire caractérisé par un accroissement rapide pendant la première période d'environ 20 s où l'écoulement hydrodynamique n'est pas encore établi. Après cette période, le déplacement  $\Delta r$  augmente lentement suivant une loi de puissance du temps pour le gel de carbopol alors qu'il augmente très rapidement pour le gel de laponite-carbopol. Cela met en évidence que le gel de carbopol est seulement déformé dans son domaine élastique et que le gel de laponite-carbopol s'écoule localement (existence d'une transition solide/liquide) avec une vitesse de l'ordre de 8  $\mu\text{m/s}$ .

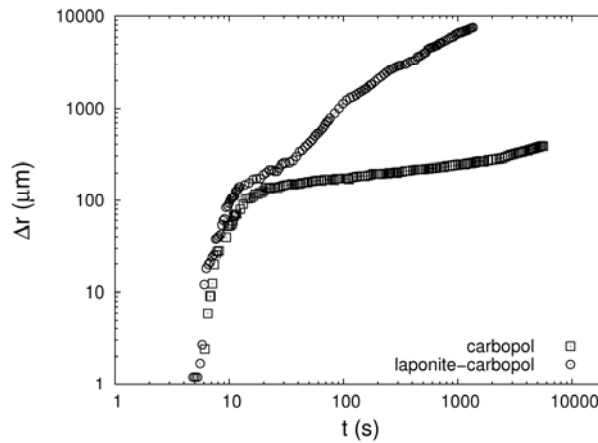


Figure 6. Déplacement temporel de la particule par rapport à sa position initiale. Cas du gel de carbopol et du gel mixte laponite-carbopol avec une même étendue partielle.

### 3.2 Suivi dimensionnel

La configuration d'un substrat au fond qui est perméable au fluide d'entraînement conduit à une érosion rapide, ce qui limite le suivi de la marche particulaire car les couches de sédiments sont arrachées. On utilise alors les particules présentes dans les couches supérieures du lit comme éléments de focalisation pour en déduire l'épaisseur réelle locale du substrat fluide ( $e_f$ ) et suivre son évolution au cours du temps. Une estimation du taux d'érosion ( $E$ ), basée sur l'hypothèse d'uniformité de l'épaisseur de l'échantillon sur toute la section de mesure, peut être faite à partir de l'expression :

$$E = -\rho \frac{e_f(t) - e_f(t_0)}{t - t_0} \quad (1)$$

avec,  $\rho$ , la masse volumique de l'échantillon,  $e_f(t_0)$  et  $e_f(t)$ , les épaisseurs du lit à l'instant initial  $t_0$  et à l'instant  $t$ , respectivement.

La figure 7 illustre un exemple de résultats obtenus dans le cas de deux sédiments modèles de même étendue soumis aux mêmes conditions hydrodynamiques (mélange eau-glycérol comme fluide d'entraînement). Les deux premières étapes d'évolution



temporelle de l'épaisseur du substrat (figure 7a) pour les deux essais sont similaires. L'épaisseur diminue faiblement pendant la première période (phase de latence), puis plus fortement et de manière assez régulière. Dans le cas du gel mixte laponite-carbopol, ces processus s'effectuent plus rapidement, et on observe, par ailleurs, une troisième étape correspondant à un enlèvement brutal de la couche de substrat restante (érosion en masse). En outre, les observations montrent que l'on a un processus de type "épluchage" continu dans le cas du gel de carbopol, et de type "fractionnement en agrégats (taille environ 75  $\mu\text{m}$ )" pour le gel de laponite-carbopol. Les taux d'érosion correspondant (figure 7b) sont du même ordre que ceux présentés par TOLHURST *et al.* (2000) dans le cas de sédiments naturels. L'évolution du taux d'érosion montre également que le substrat laponite-carbopol est plus sensible à l'érosion, et que la décision de l'occurrence de l'arrachement sur la base d'un accroissement significatif du taux d'érosion est sujette à discussion car les processus locaux sont déjà mis en jeu. Ce résultat souligne également l'importance de l'échelle du temps d'observation.

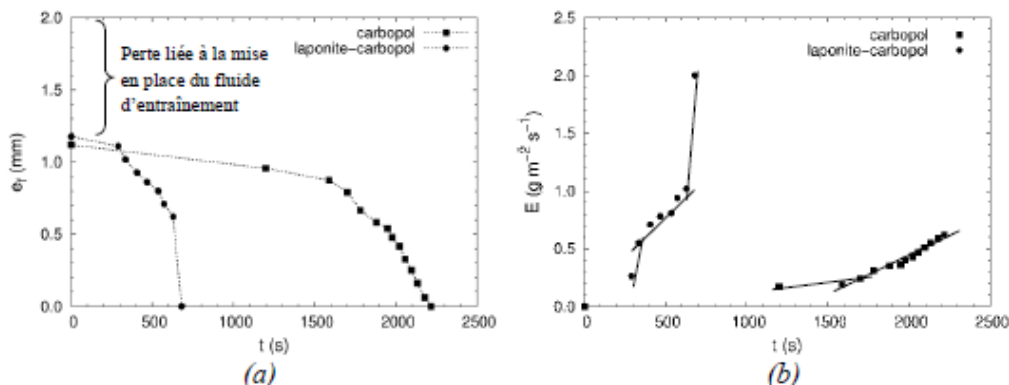


Figure 7. (a) Evolution temporelle de l'épaisseur du substrat fluide, (b) évolution temporelle du taux d'érosion du substrat fluide. Cas du gel de carbopol et du gel mixte laponite-carbopol avec une même étendue totale.

#### 4. Conclusions

Dans ce travail, nous avons présenté un canal annulaire et les techniques optiques (Particle Image Velocimetry et Particle Image Tracking) associées permettant de caractériser le champ de vitesses du fluide d'entraînement ainsi que le comportement local en érosion du sédiment modèle transparent. Différents paramètres d'analyse et quelques exemples de résultats illustrés parallèlement ont mis en évidence la robustesse du système développé et la nécessité de l'approche locale afin de pouvoir mieux comprendre les dynamiques temporelles du fond sédimentaire soumis à l'écoulement hydrodynamique. Des modifications apparaissent avant même tout arrachement de la matière (ce qui se traduit d'ordinaire par un taux d'érosion nul). Il apparaît que les phénomènes de transfert au niveau de l'interface substrat fluide/fluide d'entraînement ont une influence importante sur cette dynamique.

## 5. Références bibliographiques

- BLACK K.S., PATERSON D.M. (1997). *Measurement of the erosion potential of cohesive marine sediments: A review of current in situ technology*. Journal of Marine Environmental Engineering, 4, pp 43-83.
- COUSSOT P., RAYNAUD J.S., BERTRAND F., MOUCHERONT P., GUILBAUD J.P., HUYNH H.T., JARNY S., LESUEUR D. (2002). *Coexistence of liquid and solid phases in flowing soft glassy materials*. Physical Review Letters, 88, pp 1-4. doi:10.1103/PhysRevLett.88.218301
- LE HIR P., CANN P., JESTIN H., BASSOULLET P., (2006). *Instrumentation légère pour la mesure de l'érodabilité des sédiments vaseux ou sablo-vaseux*. IX<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest, pp 539-546. doi:10.5150/jngcgc.2006.052-L
- LUNDKVIST M., GRUE M., FRIEND P.L., FLINDT M.R. (2007). *The relative contributions of physical and microbiological factors to cohesive sediment stability*. Continental Shelf Research, 27, pp 1143-1152. doi:10.1016/j.csr.2006.01.021
- MØLLER P.C.F., MEWIS J., BONN D. (2006). *Yield stress and thixotropy: on the difficulty of measuring yield stresses in practice*. Soft Matter, 2, pp 274-283. doi:10.1039/B517840A
- POUV K.S., BESQ A., GUILLOU S. (2009). *Outils rhéo-optiques pour la caractérisation macroscopique et locale de matériaux transparents*. 44<sup>ème</sup> colloque du Groupe Français de Rhéologie, Strasbourg.
- POUV K.S., BESQ A., GUILLOU S. (2012). *Rheometric study for elaborating transparent model of cohesive sediments for local investigations of erosion behavior*. Revue Paralia, 5, pp 1.1-1.14. doi:10.5150/revue-paralia.2012.001
- SANFORD L.P. (2006). *Uncertainties in sediment erodibility estimates due to a lack of standards for experimental protocols and data interpretation*. Integrated Environmental Assessment and Management, 2(1), pp 29-34. doi:10.1002/ieam.5630020106
- SBALZARINI I.F., KOUMOUTSAKOS P. (2005). *Feature point tracking and trajectory analysis for video imaging in cell biology*. J. Struct. Biol., 152(2), pp 182-195. doi:10.1016/j.jsb.2005.06.002
- TOLHURST T.J., BLACK K.S., PATERSON D.M., MITCHENER H.J., TERMAAT G.R., SHAYLER S.A. (2000). *A comparison and measurement standardization of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments*. Continental Shelf Research, 20, pp 1397-1418. doi:10.1016/S0278-4343(00)00029-7
- WIDDOWS J., FRIEND P.L., BALE A.J., BRINSLEY M.D., POPE N.D., THOMPSON C.E.L. (2007). *Inter-comparison between five devices for determining erodibility of intertidal sediments*. Continental Shelf Research, 27, pp 1174-1189. doi:10.1016/j.csr.2005.10.006