

Etude expérimentale d'érosion d'un sédiment modèle cohésif transparent

Zaynab TARHINI¹, Romain BELLANGER¹, Sébastien JARNY¹, Alain TEXIER¹

1. Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, F-86962 Futuroscope Chasseneuil, France. zaynab.tarhini@univ-poitiers.fr

Résumé :

Dans cette étude, un modèle de sédiment cohésif (un gel) qui a les mêmes propriétés rhéologiques qu'un sédiment naturel a été créé. Le but est d'utiliser ce modèle pour une étude d'érosion dans une veine hydrosédimentaire. Dans un premier temps, une étude rhéologique est faite pour caractériser le modèle de sédiment. Dans un deuxième temps, la veine est qualifiée en eau pure sans présence de sédiments grâce à l'outil de mesure optique PIV (Particle Image Velocimetry) afin d'obtenir le champ de vitesse de référence et remonter à l'énergie cinétique turbulente et aux contraintes de cisaillement agissant sur le fond solide. Enfin, après avoir défini les cas où le sédiment modèle est érodé, de nouvelles mesures PIV sont réalisées en remplaçant la paroi solide par le sédiment modèle transparent.

Mots-clés : Sédiment cohésif transparent, Erosion, Mesure PIV, Veine hydrosédimentaire

Abstract:

In this study, a cohesive sediment model (a gel) with the same rheological properties as natural one is created. The aim is to use this model to study erosion in a narrow channel. First, a rheological study is done to characterize the sediment model. Secondly, the channel is qualified in pure water without the presence of sediment by using optical measurement PIV (particle image velocimetry) in order to obtain the reference velocity field and back to turbulent kinetic energy and shear stress acting on the solid background. Finally, after looking to cases where the sediment model erodes, a new measurement of PIV is done by replacing the solid background by the transparent sediment model.

Keywords: Transparent cohesive sediment, Erosion, PIV measurement, Narrow channel.

1. Introduction

Dans les cours d'eau, les rivières, les ports, la présence de sédiments cohésifs est source de nombreux problèmes d'aménagement. Ces sédiments cohésifs dénommés « boues » ont des caractéristiques viscoplastiques et de thixotropie (TOORMAN, 1997). Pour caractériser l'érosion des sédiments cohésifs, deux paramètres doivent être identifiés : la contrainte critique d'érosion due aux forces hydrodynamiques et la contrainte seuil du sédiment. Les études expérimentales précédentes sur l'érosion ont déjà défini des

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

formules reliant la contrainte seuil des sédiments à la vitesse critique d'érosion (MIGNIOT, 1989). *In situ*, la contrainte de frottement s'exerçant sur le lit de sédiment est estimée en utilisant la mesure ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) et en utilisant des méthodes d'estimation (profil logarithmique, énergie cinétique turbulente TKE). La mesure ADV est faite au-dessus du lit de sédiment à quelques dizaines de centimètres du fait de l'incertitude de la position exacte de l'interface (KIM *et al.*, 2000). Cela entraîne des incertitudes importantes quant à la valeur de cette contrainte de frottement, d'où la nécessité de s'approcher de l'interface lit de sédiment/eau par une mesure directe.

Cette étude est basée sur le développement d'un modèle transparent de sédiment cohésif pour permettre des mesures optiques à proximité du lit de sédiment et fournir des informations cinématiques locales lors des essais d'érosion dans une veine hydrodynamique rectiligne. Tout d'abord un sédiment cohésif transparent est fabriqué avec des propriétés rhéologiques similaires à un sédiment naturel (POUV *et al.*, 2012). Deuxièmement, la veine hydrodynamique est qualifiée en écoulement en eau adoucie sans sédiment en utilisant la mesure optique PIV (Particle Image Velocimetry). Enfin, des expériences d'érosion du sédiment modèle sont faites en utilisant la PIV pour avoir accès simultanément aux champs de vitesses dans la colonne d'eau et à l'interface avec le sédiment transparent.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Le modèle transparent de sédiment cohésif est préparé à partir d'une argile synthétique, la Laponite RD (Rockwood), et d'un polymère, le Carboxyméthylcellulose (Prolabo). La Laponite apporte les propriétés thixotropiques et le Carboxyméthylcellulose (CMC) renforce les effets viscoplastiques du mélange. Dans un premier temps, la poudre de CMC (0,5% de concentration en masse) est ajoutée progressivement à l'eau adoucie (la même que celle utilisée dans la veine) à 400 tr/min pendant une heure sur un agitateur magnétique. Dans un deuxième temps, la suspension de Laponite (1% de concentration en masse) est préparée en ajoutant progressivement la poudre à l'eau adoucie sous agitation avec un disperseur Ultra-Turrax (IKA) à 11000 tr/min pendant 15 minutes et cela un quart d'heure avant la fin de la préparation de la solution de CMC. La suspension de Laponite est ensuite versée à la solution de CMC sur l'agitateur magnétique à 1100 tr/min pendant une heure. Pour préparer 1 litre de suspension, nous avons utilisé l'agitateur à hélice de type Controlab T00251 / R01 à 270 tr/min pendant l'étape finale de mélange pendant une heure. Le sédiment transparent a une masse volumique de $999,79 \pm 1,95 \text{ kg.m}^{-3}$. Cette dernière a été mesurée par double pesée à l'aide d'un pycnomètre. Deux volumes de mélange ont été fabriqués, 250 ml pour les essais purement rhéométriques et 1 litre pour les essais dans le canal. Dans les deux cas

la répartition est faite de sorte à avoir 1/3 de l'eau pour la solution de CMC et 2/3 pour la suspension de Laponite.

Cette suspension est appelée suspension modèle mère et est laissée au repos pendant vingt jours avant de s'en servir, afin que l'hydratation soit totale et que les propriétés rhéologiques soient stables. Pendant cette période de maturation les suspensions sont stockées dans des bidons plastiques et laissées au repos à température ambiante.

Ensuite pour les tests d'érosion, cette suspension mère peut être diluée afin d'ajuster les propriétés rhéologiques aux conditions hydrodynamiques appliquées. Pour cela, la masse d'eau nécessaire à l'obtention de la concentration souhaitée est ajoutée. Après cela, le mélange est effectué avec l'agitateur à hélice de type Controlab T00251 / R01 à 270 tr/min pendant 300 s.

2.2 Méthodes

La caractérisation rhéologique du sédiment transparent est réalisée avec un rhéomètre DHR-2 (TA Instruments) en utilisant la géométrie plan-plan de diamètre 4cm. Les deux surfaces sont recouvertes d'un papier de verre P240 de rugosité moyenne 58,5 μm pour minimiser l'effet de glissement. Chaque mesure est réalisée avec un entrefer de 300 μm . Toutes les mesures débutent par l'application d'un précisaillement de 10 s^{-1} pendant 120 s suivi par un repos de 600s pour assurer une mesure reproductible. Puis des paliers de vitesses de cisaillement, allant de 10^{-3} à 1000 s^{-1} , sont appliqués par valeurs croissantes puis décroissantes pour obtenir la courbe d'écoulement. Chaque courbe est corrigée en utilisant la formule de Rabinowicz pour minimiser l'erreur existant sur l'estimation de la vitesse de cisaillement en utilisant la géométrie plan-plan (COUSSOT *et al.*, 1999).

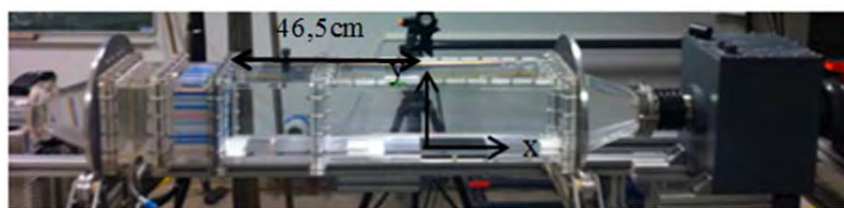


Figure 1. Veine hydrodynamique.

La veine hydrodynamique utilisée dans cette étude (voir figure 1) est une veine transparente en PMMA de section normale (160 mm x 160 mm). L'écoulement est réalisé par l'intermédiaire de deux pompes de type Moineau (PCM) montées en parallèle afin d'obtenir une gamme de débits de 0 à 112,72 dm^3/min . Nous fixons le débit souhaité en jouant sur les puissances des moteurs via des potentiomètres, le contrôle du débit étant réalisé par l'intermédiaire d'un débitmètre magnétique (PROMAG 10) d'une précision de $10^{-4} \text{ dm}^3/\text{min}$. Un nid d'abeille placé au début de la veine permet d'homogénéiser l'écoulement. Une plaque en PMMA de 1 cm d'épaisseur a été placée au fond de la veine afin de générer une cavité pour placer les sédiments. La

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

distance entre le nid d'abeille et la cavité correspondant à la zone de mesure est de 46,5 cm. Les expériences sont réalisées avec une section 160 mm de largeur et 150 mm de hauteur. L'avantage d'utiliser cette plaque est qu'un papier de verre peut être collé sur cette dernière ce qui permet de changer les conditions de génération de la couche limite en amont des sédiments. Les études sont faites en veine fermée pour éviter l'effet de la gravité. Dans un premier temps, les mesures sont faites en eau pure sans sédiment dans deux conditions : condition lisse (CL, plaque nue) et condition rugueuse (CR-P180 où la plaque est recouverte d'un papier de verre P180 où les grains ont une taille moyenne de 82 μm). Ensuite, le fond de la veine est remplacé par le sédiment transparent et une comparaison entre les champs de vitesses dans les conditions lisse ou rugueuse peut être réalisée. Nous ne présentons ici que les résultats relatifs à la condition rugueuse. Toutes les mesures sont effectuées dans le plan médian de la veine où il a été vérifié que la veine a un écoulement bidimensionnel.

La mise en place du sédiment modèle se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord la suspension diluée est versée lentement dans la cavité jusqu'à araser le niveau de la plaque. Avant de mettre en eau, un film plastique semi-rigide est placé sur le sédiment afin de le protéger et éviter le contact avec l'eau lors du remplissage. Ce dernier se fait avec un tuyau que l'on place dans la veine près du nid d'abeille avec un débit faible pour éviter toutes perturbations sur le sédiment. Il faut 40 min pour remplir entièrement la veine. Le couvercle est alors fermé et la pompe est mise en marche à faible débit (38,943 dm^3/min) afin d'évacuer les bulles d'air présentes dans le circuit. Cette étape permet aussi d'alimenter la veine de mesure avec de l'eauensemencée qui se trouve dans la cuve et ainsi de pouvoir commencer les mesures de PIV dès les premiers instants. Le couvercle est alors enlevé et le film protecteur est retiré manuellement en prenant toutes les précautions pour ne pas perturber la suspension diluée. Enfin le couvercle est remis et le débit d'étude est imposé brutalement et les mesures PIV peuvent débiter directement. La phase où le sédiment est en contact avec l'eau sans écoulement imposé dure 5 min maximum, ce qui ne laisse pas le temps à une dilution de s'opérer. De plus, le sédiment utilisé dans les expériences d'érosion ne présente pas de propriétés de thixotropie, le temps de remplissage n'influe donc pas sur ces propriétés rhéologiques. La procédure est recommencée pour chaque nouvel échantillon de sédiment en vidangeant le canal et en nettoyant et séchant la veine (le cube gris à droite de la veine (figure 1) permet de vidanger la moitié de la veine rapidement sans vider la cuve et ainsi accélérer la procédure).

Dans cette étude, les mesures de PIV sont obtenues en utilisant un laser Nd-YAG de longueur d'onde 532 nm et une caméra CCD de type Jai RM-4200CL dont la résolution est réglée à 2048×1024 pixels. La caméra est équipée d'un objectif de distance focale 105 mm. L'ouverture de l'appareil est réglée à 5,6 et un filtre passe bande à 532 nm est appliqué pour recevoir seulement la longueur d'onde émise par le plan de mesure. Le laser est placé au-dessus du canal et la nappe laser suit le plan médian dans le sens de

l'écoulement. La caméra, quant à elle, est placée perpendiculairement à la nappe laser. L'écoulement estensemencé avec des particules Vestosint (particules de polyamide) de diamètre moyen 20 μm . Ces particules ont la même masse volumique que l'eau de manière à suivre l'écoulement. 1500 images sont prises pour le cas CL et 2000 images sont prises pour le cas CR-P180, nombre d'images nécessaires pour assurer la convergence statistique des valeurs moyennes. Pour les paramètres de mesure de PIV (pour une vitesse débitante V_d de 2,5 cm/s) un doublet d'images est pris à une fréquence d'acquisition de 7,4 Hz et le temps entre les deux images est de 62 ms. Le calcul des champs de vitesses se fait par le logiciel Dynamic Studio de DANTEC dans lequel une procédure identique est programmée pour tous les essais. Un masque délimitant la zone d'intérêt est tout d'abord appliqué sur les images brutes. Puis la valeur minimum d'intensité de l'ensemble de la série est calculée puis retranchée sur toutes les images. Les champs de vitesses instantanés sont obtenus par corrélation croisée des images par des fenêtres d'interrogation adaptatives de 128×128 pixels réduits à 32×32 pixels et un taux de recouvrement de 50%. Deux passes sont effectuées pour chaque taille de fenêtre d'interrogation.

Dans le cas des tests avec les sédiments, deux types de particules d'ensemencement sont utilisées pour distinguer les champs de vitesse dans la colonne d'eau et à l'interface avec les sédiments. Des particules de Vestosint classiques (20 μm) sont utilisées dans l'eau et un mélange de particules de Vestosint classiques (20 μm) et de Vestosint avec de la rhodamine encapsulée (20 μm) sont dispersées dans le sédiment avec une concentration massique de 0,01%. 3000 images sont prises et 2 caméras CCD sont utilisées. L'une équipée d'un filtre passe bande (532 nm) qui permet de repérer les particules classiques présentes dans l'eau et le sédiment, et l'autre équipée d'un filtre passe haut (540 nm) qui permet de récupérer le signal de fluorescence induite par la rhodamine. L'expérience est faite dans le cas CR-P180.

3. Résultats

3.1 Résultats rhéologiques

Les propriétés rhéologiques de la suspension mère évoluent avec le temps, mais atteignent un état stable après 20 jours. Cela a été confirmé en suivant les propriétés rhéologiques durant 35 jours. L'effet de la concentration sur les propriétés rhéologiques est étudié en réalisant des dilutions de la suspension mère variant de 30% à 80%. Ces pourcentages correspondent à des concentrations massiques et une suspension diluée à 30% est faite de 30% d'eau et de 70% de suspension mère. Les dilutions sont testées après 2 jours de repos et la stabilité de leurs propriétés n'a pas été suivie au cours du temps étant donné qu'elles sont utilisées après ces deux jours pour les essais dans le canal. Les rhéogrammes obtenus présentent une courbe de montée et une courbe de descente (figure 2a). Cette dernière est toujours située en-dessous de la courbe de

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

montée. Nous retrouvons ici le comportement viscoplastique des vases naturelles (TOORMAN, 1997). Elles suivent le modèle d’Herschel-Bulkley suivant :

$$\begin{cases} \tau = \tau_s + k\dot{\gamma}^n & \text{pour } \tau > \tau_s \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{pour } \tau < \tau_s \end{cases} \quad (1)$$

avec τ la contrainte de cisaillement, τ_s la contrainte seuil, k la consistance, n l’indice de viscosité et $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement.

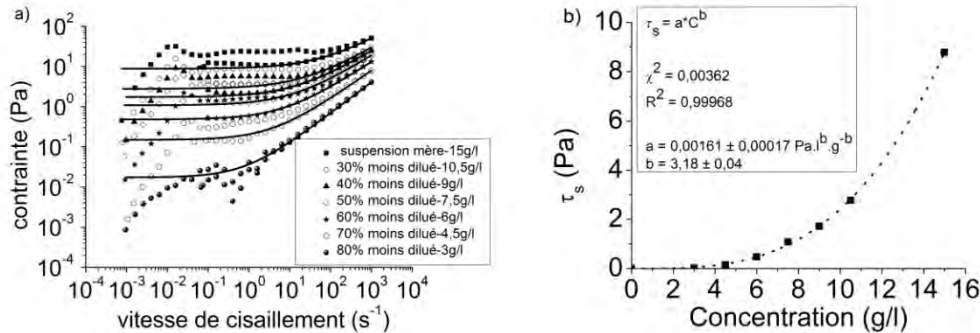


Figure 2. a) Rhéogrammes des suspensions diluées de la suspension mère b) Evolution de la contrainte seuil en fonction de la concentration.

Le modèle a été appliqué sur les courbes de descente des rhéogrammes afin d’estimer les contraintes seuils. D’un point de vue physique les seuils du fond sédimentaire se rapprochent plus des seuils obtenus par les courbes de montée (POUV *et al.*, 2014). Néanmoins, notre analyse s’est portée sur la courbe de descente pour nous mettre dans les mêmes conditions que les expériences de MIGNIOT, 1989 pour une comparaison purement rhéologique. La concentration (g/l) est calculée par la masse de fraction solide (Laponite + CMC) sur le volume de la suspension. Les courbes d’écoulement sont ainsi classées en fonction de la concentration (voir figure 2a) : la concentration la plus faible conduit à une faible contrainte seuil, une faible consistance et un indice de viscosité qui tend vers 1. L’évolution de la contrainte seuil en fonction de la fraction solide suit une loi de puissance qui a été appliquée sur de nombreux échantillons de vases naturelles (voir figure 2b), (MIGNIOT, 1989). Cette loi simpliste ne permet pas de prendre en considération le fait qu’il existe une concentration critique minimale de matière pour que des interconnexions entre les particules s’établissent conduisant à la formation d’un seuil. La première valeur de contrainte seuil significative est obtenue pour une concentration de 4 g/l. Nous l’utilisons ici afin de comparer les propriétés de vases naturelles à celles de notre sédiment modèle. En effet, ce dernier ne suit pas exactement la loi de Migniot qui admet un exposant égal à 6 pour les vases plastiques et des coefficients a de l’ordre 10^{-15} .

Cette première étape nous a permis de définir un protocole d’analyse rhéométrique des sédiments modèles. Le sédiment placé dans le canal a donc été analysé de la même manière, les propriétés rhéologiques de la suspension diluée pouvant varier en fonction

de la préparation (figure 3). Cela tient essentiellement au volume utilisé qui est plus important et à l'énergie mise en œuvre qui ne conduit pas à une même distribution des constituants. Nous obtenons ici un matériau avec une contrainte seuil de 0,012 Pa, légèrement inférieure à celle obtenue avec les essais précédents.

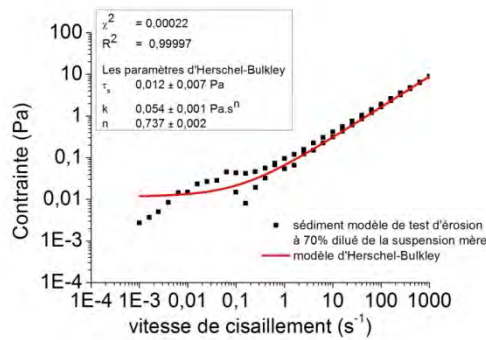


Figure 3. Rhéogramme de sédiment modèle de test d'érosion.

3.2 Qualification de la veine sans sédiment

Cette étape est considérée comme l'étape de référence avant les tests d'érosion. Plusieurs vitesses moyennes d'écoulement V_d sont testées mais nous présentons seulement ici les résultats obtenus avec la vitesse $V_d = 2,5$ cm/s. Le nombre de Reynolds associé à cette vitesse est calculé en utilisant le diamètre hydraulique et est égal à 4339. Le régime d'écoulement est de transition. Cependant, deux conditions sont testées : condition lisse CL et condition rugueuse CR-P180. Le papier de verre est placé à la sortie du nid d'abeilles jusqu'à la zone d'étude. La température de l'eau est de 25°C et la viscosité cinématique égale à $8,93 \times 10^{-7}$ m²/s.

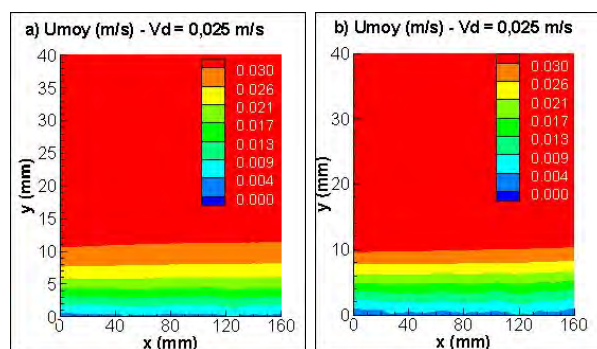


Figure 4. Vitesse moyenne de a) 1500 images cas CL b) 2000 images cas CR-P180.

La figure 4 montre les champs de vitesses moyennes dans les deux cas, lisse (a) et rugueux (b), pour une même zone d'étude. Ceci montre que dans la zone de mesure la vitesse ne change quasiment pas en fonction de x. Le champ de vitesse moyenne est divisé en deux zones : une zone près du fond où la vitesse varie graduellement et une zone qui n'est pas influencée par le fond où la vitesse est relativement supérieure à la

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

vitesse débitante à cause de la conservation du débit et de la présence des couches limites d'épaisseur non négligeables.

A partir du champ de vitesses obtenu par la mesure PIV, il est possible de passer au champ de contrainte. Les graphiques de la figure 5 montrent la contrainte turbulente et la contrainte laminaire dans les deux cas lisse et rugueux, sachant que :

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} \quad (2)$$

$$\tau_l = \mu (dU_{moy})/dy \quad (3)$$

Avec τ_t la contrainte turbulente et τ_l la contrainte laminaire, ρ la masse volumique du fluide, $\overline{u'v'}$ est la moyenne du produit des fluctuations de vitesse dans les deux directions de l'écoulement, μ est la viscosité dynamique et $(dU_{moy})/dy$ est la variation de la vitesse moyenne par rapport à y .

La figure 5 montre tout d'abord que la zone de contrainte maximale est établie près du fond dans les deux cas CL et CR-P180. La contrainte laminaire est plus élevée que la contrainte turbulente et ce dans les deux cas. Par contre les contraintes turbulentes présentent une intensité plus forte dans le cas CR-P180, cela est directement lié à la présence de la rugosité qui accroît la turbulence près du fond. Pour le cas des contraintes laminaires, il existe une évolution linéaire qui croît en se rapprochant du fond (LE HIR, 2008). Dans la suite, on représente l'énergie cinétique turbulente k calculée selon la formule suivante :

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (4)$$

Avec u' est la fluctuation de vitesse dans le sens de l'écoulement et v' la fluctuation de vitesse dans le sens vertical.

Sur la figure 6, on observe qu'une énergie cinétique turbulente très faible règne dans la veine (de l'ordre de $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$). L'incertitude de mesure de l'énergie cinétique turbulente est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_k^2 = u'^2 \sigma_{u'}^2 + v'^2 \sigma_{v'}^2 \quad (5)$$

Avec $\sigma_{u'}$ et $\sigma_{v'}$ sont les écarts-types sur les fluctuations u' et v' respectivement.

Après calcul, l'incertitude σ_k est de l'ordre de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Les valeurs obtenues sur la figure 6 sont alors de l'ordre de l'incertitude. Dans les deux cas étudiés, il n'existe pas de zone où la turbulence s'est développée.

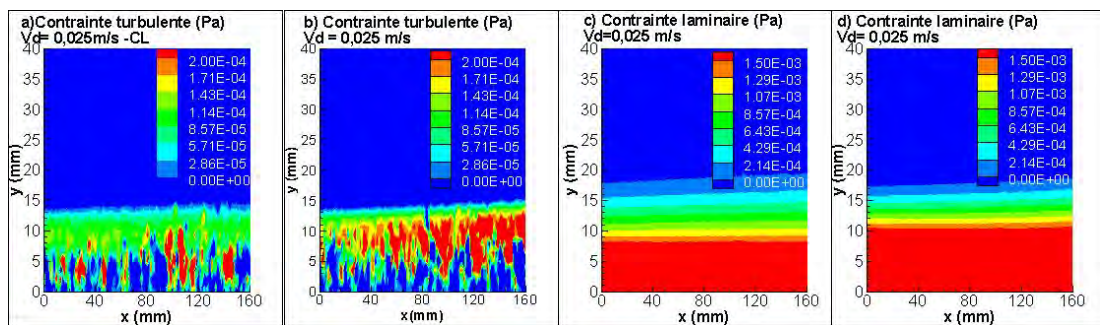


Fig. 5. Contrainte turbulente : a) CL b) CR-P180. Contrainte laminaire : c) CL d) CR-P180.

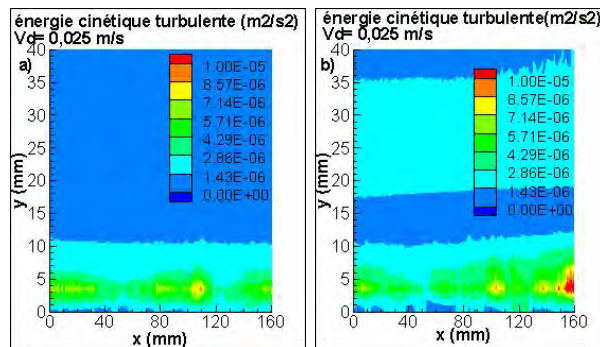


Figure 6. Energie cinétique turbulente : a) CL b) CR-P180.

3.3 Résultats des expériences d'érosion de sédiment modèle

Après avoir fait plusieurs expériences avec le sédiment modèle, nous avons constaté que pour une vitesse de 2,5 cm/s et en utilisant la rugosité P180, le sédiment modèle dilué à 70% peut s'éroder. Le sédiment modèle dilué présente une contrainte seuil de 0,012 Pa, un index de viscosité de 0,7 et une consistance de 0,05 Pa.sⁿ (figure 3). Nous présentons par la suite, comme précédemment, le champ de vitesse, le champ de contrainte laminaire et turbulente et l'énergie cinétique turbulente dans le cas de la vitesse 2,5 cm/s en utilisant la rugosité P180. L'acquisition des images de PIV est faite après 20 min de circulation pour que les conditions hydrodynamiques soient établies (interface sédimentaire érodée et quasiment non évolutive). Nous remarquons aussi qu'il n'y a pas de mélange à proprement parler entre la colonne d'eau et le sédiment modèle. Tout se passe comme si nous avons deux couches de fluides non miscibles. Contrairement à l'étude de POUV *et al.*, 2014 qui ont utilisé des méthodes optiques similaires pour étudier l'érosion, nous ne faisons pas un suivi temporel du déplacement du sédiment par suivi de particule. Nous nous plaçons ici dans un régime établi qui nous permet de moyenniser les informations durant la mesure et doit nous permettre d'accéder à la contrainte moyenne de frottement agissant sur la couche de sédiment modèle.

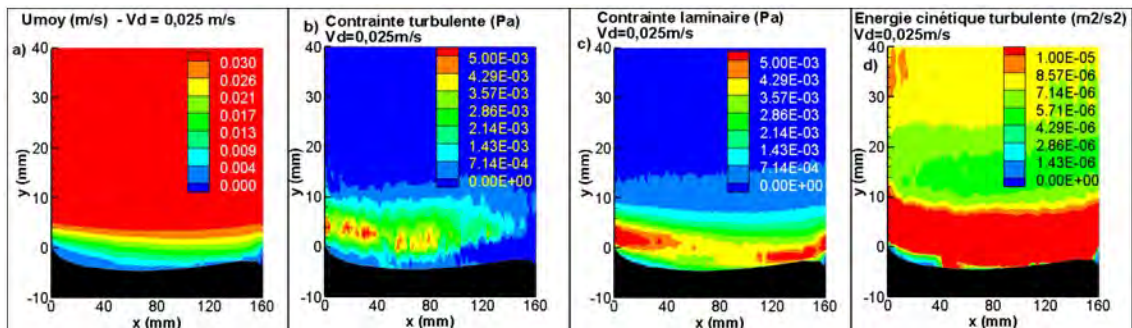


Figure 7. a) vitesse moyenne b) contrainte turbulente c) contrainte laminaire d) Energie cinétique turbulente

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Pour tous les tracés de la figure 7, la hauteur est représentée depuis -10 mm qui correspond à l'épaisseur de sédiment. Nous retrouvons un profil de vitesse moyen qui varie graduellement à l'interface sédiment/eau avant d'atteindre la vitesse nominale supérieure à la vitesse débitante. Ici la vitesse est nulle dans la couche de sédiment loin de l'interface. Les contraintes de frottement sont beaucoup plus importantes, d'un ordre de grandeur. En effet, la présence d'une interface mobile entre l'eau et le sédiment conduit à la formation de tourbillons qui sont convectés par les ondulations de l'interface. Cela se traduit par une énergie cinétique turbulente et des contraintes turbulentes plus importantes. La contrainte maximale appliquée au fond (0,004 Pa) est de l'ordre de grandeur de la contrainte seuil de mobilité du sédiment ce qui explique la mise en mouvement et l'érosion du sédiment modèle.

4. Conclusions

Un modèle transparent de sédiment cohésif avec les mêmes propriétés rhéologiques qu'un sédiment naturel est utilisé pour étudier l'érosion dans une veine hydrodynamique. Des mesures optiques permettent d'accéder aux champs de vitesses locaux au sein de l'eau et à l'interface du sédiment modèle simultanément. La qualification de la veine sans sédiment montre que le papier de verre utilisé a augmenté la turbulence mais la contrainte laminaire reste supérieure à celle turbulente. Pour le cas de l'expérience avec sédiment, l'écoulement à cette interface génère plus de turbulence augmentant ainsi la contrainte turbulente et entraînant l'érosion du sédiment en s'approchant de la contrainte seuil.

5. Références bibliographiques

- COUSSOT P., ANCEY C. (1999). *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. EDP Sciences, Les Hulis, 266 p.
- KIM S.-C., FRIEDRICHS C.T., MAA J.P.-Y., WRIGHT L.D. (2000). *Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimetry data*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126(6), pp 399-406.
- LE HIR P. (2008). *Aide-mémoire de dynamique sédimentaire*. 7^{ème} édition.
- MIGNIOT C. (1989). *Tassement et rhéologie des vases – Deuxième partie*. La houille blanche, Vol. 2: pp 95-111.
- 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, Vol. 5, pp 1.1-1.14. <http://dx.doi.org/10.5150/revue-paralia.2012.001>
- POUV K.S., BESQ A., GUILLOU S., TOORMAN E.A. (2014). *On cohesive sediment erosion: A first experimental study of the local processes using transparent model material*. Adv. in Water Resources, Vol. 72, pp 71-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.05.012>
- TOORMAN E.A. (1997). *Modelling the thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions*, Rheologica Acta, Vol. 36, pp 56-65. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00366724>