

## **ETUDE EXPERIMENTALE D'UN LIT DE MATERIAUX VISCO-ELASTO-PLASTIQUES SOUMIS A DES ONDES**

### ***EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERACTIONS BETWEEN VISCO-ELASTO-PLASTIC BED AND WAVES***

**P. LECOSTEY<sup>(1)</sup>, G. GOMIT<sup>(1)</sup>, J. JARNY<sup>(1)</sup>, L. THOMAS<sup>(1)</sup>, D. PHAM VAN BANG<sup>(2)</sup>**

*pierre.lecostey@univ-poitiers.fr ; guillaume.gomit@univ-poitiers.fr ;  
damien.pham\_van\_bang@inrs.ca*

<sup>(1)</sup> Institut P', Université de Poitiers, UPR 3346, Poitiers, France

<sup>(2)</sup> Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Québec, Canada

#### **Résumé**

Cette étude propose une étude expérimentale sur l'interaction entre un lit de matériau viscoplastique et des ondes hydrodynamiques. Elle s'inscrit dans un projet visant à mieux comprendre les phénomènes d'érosion de fonds marins cohésifs, des vases par exemple, sous les vagues et les courants. En particulier, l'influence des caractéristiques rhéologiques du matériau et des propriétés des ondes (amplitudes) sur la réponse du lit est présentée dans ce papier.

#### **Summary**

This study proposes an experimental study on the interaction between a viscoplastic material bed and hydrodynamic waves. This study is part of a project that aims to better understand the erosion phenomena of cohesive seabeds, such as mud, under waves and currents. In particular, the influence of the rheological characteristics of the material and the properties of the waves (amplitudes) on the response of the bed mud will be presented in this paper.

## **I – Introduction**

L'étude de la réponse d'un lit sédimentaire cohésif sous l'effet d'un écoulement présente un intérêt majeur pour les questions environnementales, notamment les prévisions morphodynamiques ou l'érosion dans les ports ou les estuaires (*Shakeel et al. (2021)*). Le phénomène d'érosion des sédiments résulte de l'équilibre entre les contraintes hydrodynamique sur le fond et la résistance du matériau à l'érosion. La nature des sédiments cohésifs entraîne des interactions interparticulaires dépendantes de la composition des sédiments. Ce type de sédiment présente des propriétés rhéologiques spécifiques. En particulier, des modèles viscoplastiques sont souvent utilisés pour représenter les propriétés d'écoulement de la boue (par exemple, le modèle de Herschel-Bulkley ou de Bingham *Melinge et al., (2015)*). Les études d'érosion de sédiments cohésifs sont principalement basées sur des expériences en canaux de laboratoire et sur des sédiments naturels collectées in-situ (*Zhang et al. (2017)*). Cependant, la complexité des propriétés des sédiments qui dépendent de la granulométrie, de la densité, de la salinité ou du pH (voir *Grabowski et al. (2011)*) rend difficile l'analyse de l'influence de chaque paramètre et l'obtention de résultats reproductibles.

L'interaction entre un lit de vase et la contrainte de cisaillement induite par les vagues a été étudiée de façon théorique dans plusieurs études comme *Mei et Liu (1987)* ou *Maa et Mehta (1990)* par exemple. Dans cette dernière, le lit de vase cohésif est assimilé à un matériau viscoélastique linéaire caractérisé par une densité, une viscosité et un module de cisaillement. Dans ces études, les auteurs s'intéressent à la réponse du lit (vitesse, déphasage, pressions, contrainte de cisaillement) mais également à l'atténuation des vagues au-dessus de ce type de matériaux.

Afin de mieux comprendre la réponse d'un lit de vase assimilé à un matériau visco-elasto-plastique, cet article présente une approche innovante basée sur un modèle de sédiment transparent soumis à des ondes. L'idée d'utiliser des sédiments modèles transparents a été introduite par *Pouv et al. (2014)* et *Tarhini (2016)*. Les propriétés optiques des sédiments permettent de suivre simultanément le mouvement des sédiments et de l'eau. L'utilisation de ces sédiments modèles produits en laboratoire permet d'ajuster facilement les paramètres rhéologiques et d'étudier la répétabilité des expériences.

Ce papier présente donc la méthode expérimentale permettant l'étude d'un lit de matériaux visco-elasto-plastique, modélisant un lit de vase, soumis à des ondes. Les résultats de déformation du lit obtenus sont présentés en fonction des paramètres rhéologiques du matériaux et de l'amplitude des ondes.

## **II Méthode expérimentale**

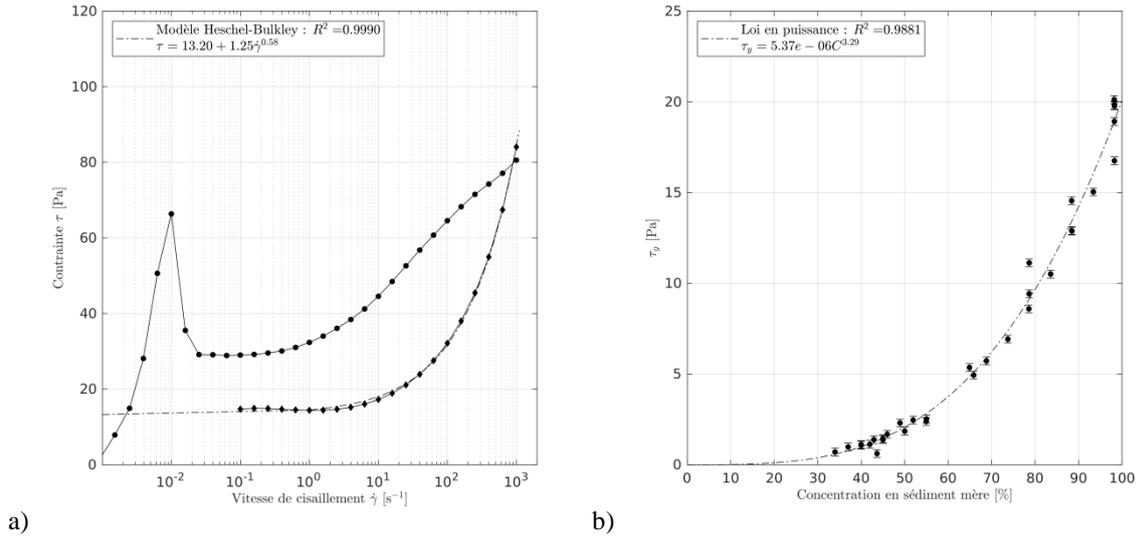
### **II – 1 Vase modèle**

La vase synthétique est obtenue par un mélange de Laponite (une argile synthétique) et de CarboxyMéthylCellulose (CMC - CH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>H - un additif alimentaire E466). La composition et la concentration du mélange ont été choisies pour obtenir un fluide ayant des caractéristiques rhéologiques similaires à celles d'un fond marin vaseux typique, c'est-à-dire ayant un comportement viscoplastique (fluide à seuil) et thixotropique (*Shakeel et al. (2021)*). Le protocole complet de la préparation du matériau est décrit dans *Tarhini (2016)* et plus récemment dans *Lecostey et al. (2022)*.

Dans ces deux études, une analyse rhéologique complète de ce mélange a été présentée. Un rhéogramme typique du matériau modèle est fourni dans la figure 1.a. Les courbes d'écoulement de montée et de descente ne se chevauchent pas en raison de la thixotropie de la solution. Le modèle de Herschel-Bulkley est souvent utilisé pour caractériser les vases naturelles, notamment par *Melinge et al. (2015)*. Ce modèle peut être écrit sous la forme suivante :

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

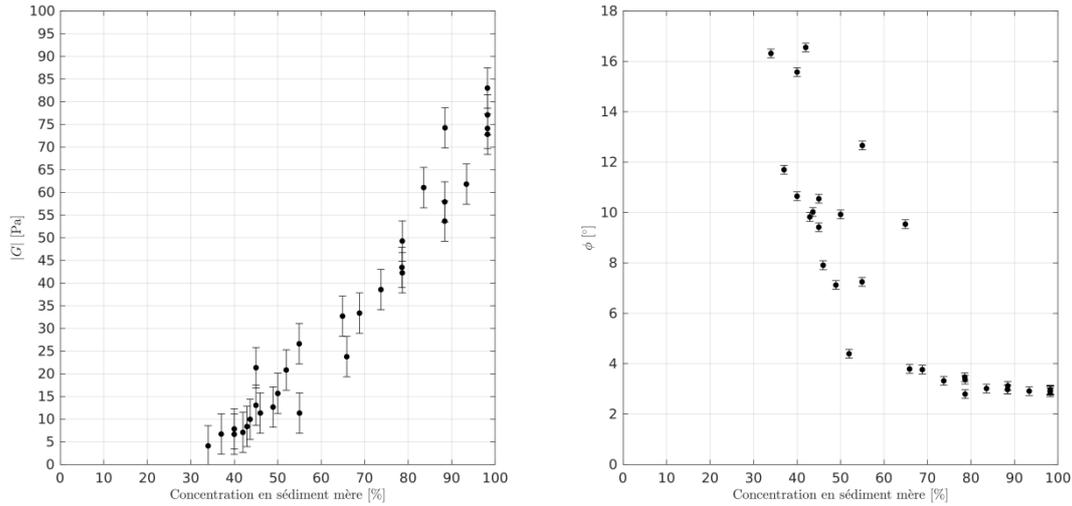
où  $\tau_s$  est la contrainte seuil,  $k$  la consistance et  $n$  l'indice de viscosité. En faisant varier la concentration du mélange, les valeurs des paramètres rhéologique peuvent être ajuster. Nous notons sur la figure 1.b que l'évolution de la contrainte seuil suit une loi de puissance comme décrit par *Migniot & Hamm (1991)* pour de la vase naturelle.



**Figure 1 Rhéogramme de la solution mère. Le modèle de Herschel-Bulkley est appliqué sur la courbe descendante. Contrainte seuil en fonction de la concentration de la solution mère.**

Pour compléter la caractérisation de la vase modèle et définir les propriétés du matériau en dessous de la contrainte seuil, c'est-à-dire lorsque le matériau se comporte comme un solide viscoélastique, des essais rhéologiques en oscillation ont été réalisés et présentés dans *Lecostey et al. 2022*. Ces essais permettent d'estimer le module de conservation  $G'$  (comportement élastique) et le module de perte  $G''$  (comportement visqueux) du matériau. A partir de ces grandeurs, le matériau peut être caractérisé par le module complexe  $|G|$  et l'angle  $\beta$  ( $\tan \beta = G''/ G'$ ) correspondant au déphasage, entre la contrainte et la déformation. Pour un comportement idéalement élastique,  $\beta = 0^\circ$ . Il n'y a pas de partie visqueuse et par conséquent,  $G'' = 0$  et  $\tan \beta = 0$ . Pour un comportement idéalement visqueux,  $\delta = 90^\circ$ . Il n'y a pas de partie élastique,  $G' = 0$  et donc la valeur de  $\tan \delta = G''/ G'$  tend vers l'infini.

Les évolutions de  $|G|$  et  $\beta$  en fonction de la concentration par rapport à la solution mère sont représentées sur la figure 2. Le module complexe augmente avec la concentration et l'angle de déphasage diminue. En d'autres termes, plus la solution est diluée, moins elle présente un comportement de solide élastique.

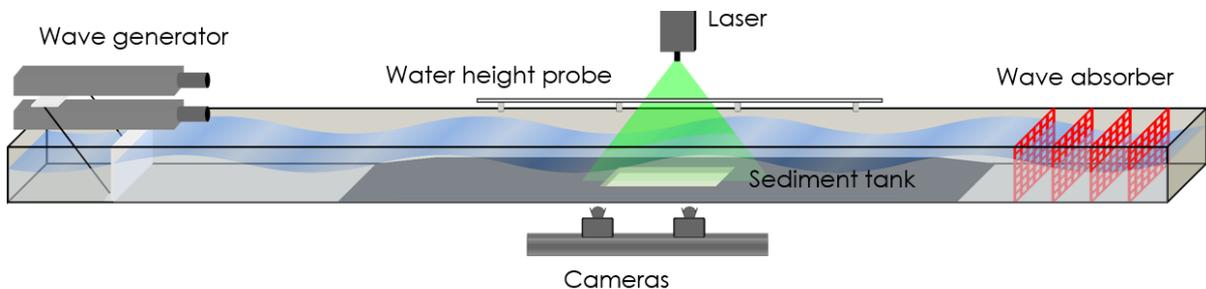


**Figure 2 Module complexe  $|G|$  en fonction de la concentration de la solution mère**

Pour les expériences d'interaction du lit soumis à des ondes, des vases modèles avec une contrainte seuil comprise entre 10 Pa et 20 Pa, un module complexe  $|G|$  compris entre 40 Pa et 83 Pa et un angle  $\beta$  compris entre  $2.9^\circ$  et  $3.4^\circ$  ont été utilisées. La concentration de *Laponite* et de *CMC* nécessaire pour ces préparations est d'environ 10 grammes par litre d'eau. La masse volumique du sédiment issu de cette préparation est proche de celle de l'eau et a été estimée à  $1008 \text{ kg/m}^3$ . Nous notons que cette valeur est inférieure à celle des sédiments naturels. De plus, pour les expériences, la boue synthétique a été colorée avec un colorant fluorescent (fluorescéine) afin de permettre la mise en place d'une méthode de mesure optique. Une étude préliminaire a montré que ce colorant avait un impact négligeable sur les paramètres rhéologiques du matériau modèle.

## II – 2 Configuration expérimental et méthode de mesure

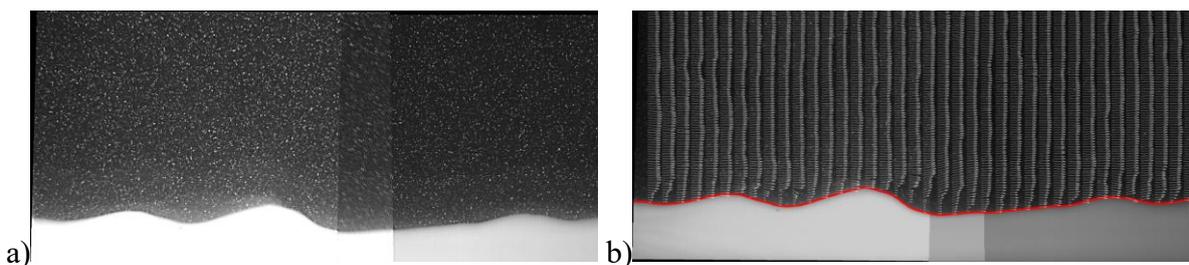
Les expériences d'interaction avec des ondes se sont déroulées dans un canal à houle de 7 m de long et 30 cm de large. La profondeur de l'eau a été fixée à 20 cm au-dessus du sédiment. Un générateur de vagues à piston permet de générer des vagues d'une amplitude comprise entre 1 et 60 mm avec des fréquences comprises entre 0,5 et 2 Hz. Des plaques de PMMA sont placées au fond du canal, entourant un lit de sédiments de 60 cm de long, 15 cm de large et de 0,03 m de haut. Ce lit de sédiment est rempli en essayant d'obtenir une surface du lit aussi plate que possible. Un schéma du dispositif expérimental est présenté figure



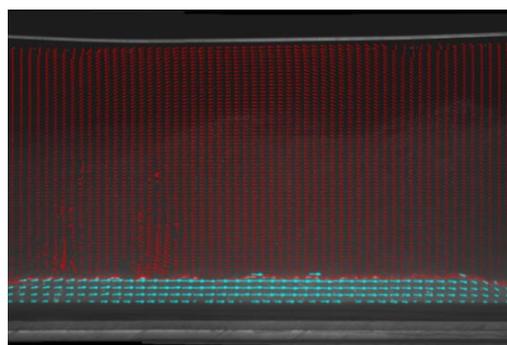
**Figure 3 Dispositif expérimental**

La surface libre est mesurée à l'aide de quatre sondes acoustiques situées le long du canal. Une méthode de mesure spécifique basée sur une technique simultanée de PLIF-PIV, développée par *Lecostey et al. 2022*, a été utilisée. Une nappe laser est générée par un laser Nd-YAG à 532 nm (vert) de  $2 \times 50 \text{ mJ}$  dans le plan vertical longitudinal central du canal. Deux caméras Dantec SpeedSense

1040 (2320 x 1726 px) ont été utilisées pour acquérir les images de la nappe laser. Le chevauchement des images issues des deux caméras fournit un champ de vision de 31 cm de long avec une résolution d'environ 0,2 mm/px. L'écoulement a été ensemencé avec des particules produites avec le protocole donné par *Pedocchi et al. (2008)*. Ces particules sont dopées à la rhodamine et ont un diamètre moyen de 50  $\mu\text{m}$  et une densité autour de 1,03. Un filtre passe-haut de 540 nm a été monté sur les lentilles de la caméra pour filtrer les réflexions du laser. Même si le pic du spectre d'émission de la fluorescéine ajoutée dans le sédiment modèle est inférieur aux 540 nm du filtre optique, la fluorescéine rayonne une partie de sa lumière au-dessus de 540 nm et permet de discriminer la vase de l'écoulement. Une image d'acquisition est présentée sur la figure 4.a. La fréquence d'acquisition était de 8 Hz, en mode double frame avec et synchronisée avec les sondes acoustiques à 50 Hz. Pour chaque expérience, 480 paires d'images ont été enregistrées. A partir des images, l'interface entre les sédiments et l'eau est détectée avec une précision de l'ordre de 0,15 px soit environ 0.03 mm (voir *Lecostey et al. (2022)*). L'écoulement dans la colonne d'eau est calculé avec un algorithme classique de PIV en utilisant les deux images de la PIV. Le déplacement à l'intérieur du sédiment est estimé sur la base d'un algorithme de PIV utilisant la première image de chaque temps d'acquisition (8 Hz). La corrélation à l'intérieur de la vase est rendue possible grâce à la présence de bulles d'air. Tous les traitements ont été développés sur la base de la librairie *Simple Library of Image Processing - SLIP*. En résumé, pour chaque instant de mesure, on obtient la surface libre, les vitesses bidimensionnelles dans l'écoulement, la position de l'interface eau/sédiment, le déplacement du sédiment. Un champ instantané lors des expériences d'interaction lit/vagues présentées dans ce papier est présenté sur la figure 5.



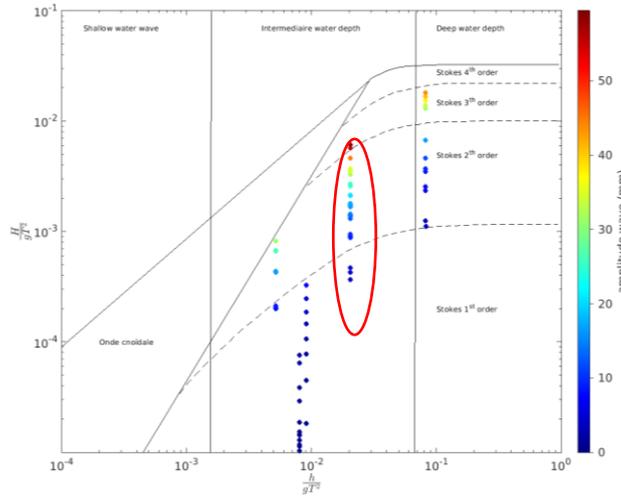
**Figure 4** Exemple d'image d'acquisition (a) et du résultat de l'algorithme de PLIF-PIV (b) dans le cas d'une étude en courant



**Figure 5** Exemple de traitement (PLIF-PIV) sous des ondes : estimation des vitesses dans l'écoulement et dans le matériau et détection de l'interface

### II – 3 Paramètres d'étude et comparaison avec la théorie

Lors de cette étude, la fréquence du batteur (entre 0.5 et 2 Hz) et l'amplitude de déplacement du batteur (entre 1 cm et 5 cm) ont été modifiées. Sur la base de la hauteur des ondes mesurée à partir des sondes acoustiques (H), de la période des ondes (T) et de la profondeur de l'eau (h), l'ensemble des données est représenté dans le graphe issu de *Le Méhauté (1976)* donnant les domaines de validité des différentes théories de la houle. Dans notre cas, la majeure partie des ondes générées correspondent à la théorie de Stokes de 1er, 2ème et 3ème ordre. Dans ce document, seuls les résultats correspondant à une fréquence fixe de 1 Hz, une amplitude de vagues comprise entre 7 mm et 44 mm avec une profondeur d'eau constante égale à  $h=0.2$  m sont présentés.



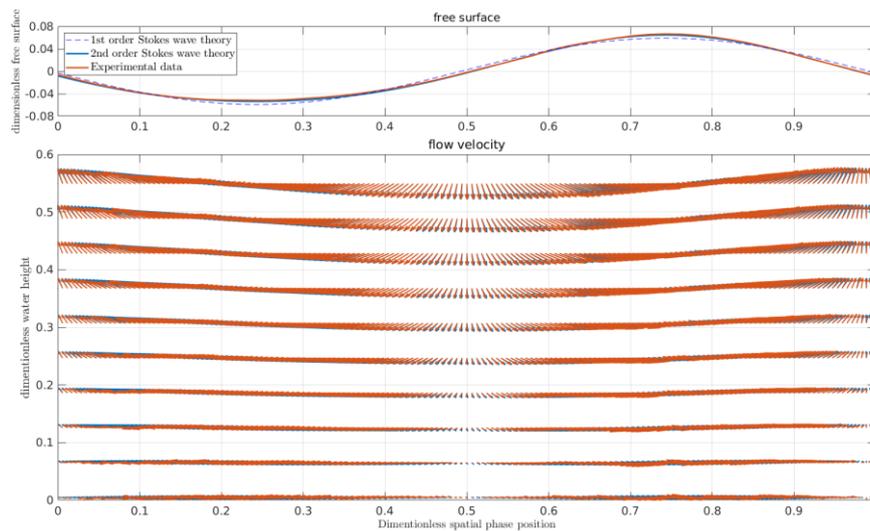
**Figure 6 Paramètres des ondes utilisés pour les essais d'interaction représenté dans le graphique indiquant la validité des théories des ondes issue de Le Méhauté, 1976. Les points entourés en rouge correspondent aux résultats présentés dans ce papier.**

En se basant sur la théorie de Stockes à l'ordre deux, les champs de vitesse dans la colonne d'eau ainsi que la forme de la surface libre mesurés avec la méthode décrite précédemment ont été comparés à la théorie. Le champ de vitesse est donné par l'équation suivante.

$$U(x, z) = a\omega \frac{\cosh(kh)}{\sinh(kh)} \cos(kx) + 3ka^2\omega \frac{\sinh(2kz)}{\sinh^4(kh)} \cos(2kx)$$

$$V(x, z) = a\omega \frac{\sinh(kh)}{\sinh(kh)} \sin(kx) + 3ka^2\omega \frac{\sinh(2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx)$$

La comparaison entre la théorie et les données expérimentales présente un très bon accord pour la surface libre et le champ de vitesse.

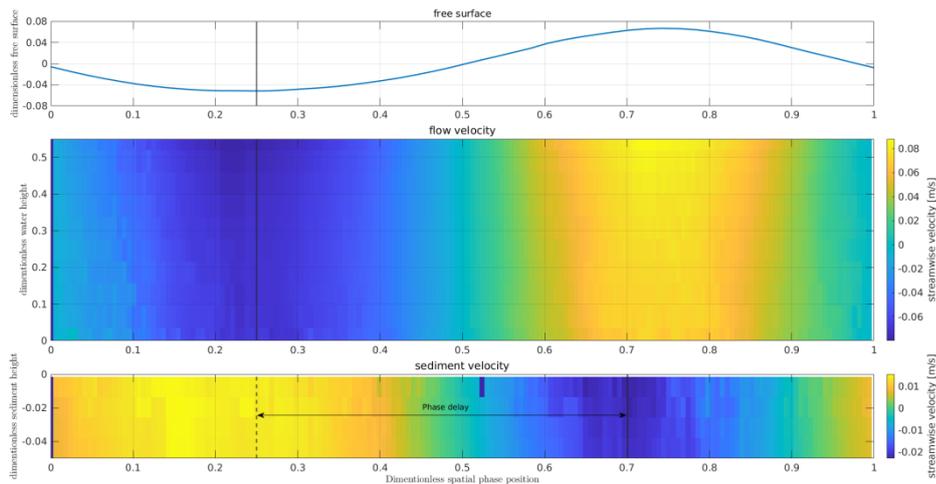


**Figure 7 Comparaison des résultats de mesure avec la théorie de Stokes à l'ordre 2**

### **III – Résultats**

Afin de traiter les données instantanées, une moyenne de phase est appliquée aux différents types de données, à savoir la surface libre, le champ de vitesse de l'écoulement, l'interface du lit et le déplacement au sein du lit de vase modèle. La moyenne de phase a été effectuée sur la base de la fréquence caractéristique de la surface libre mesurée par les capteurs acoustiques. Un exemple des différentes grandeurs est présenté sur la figure 7. A partir de ces données, l'amplitude du déplacement

au sein du matériaux ainsi que le déphasage entre le déplacement de l'écoulement et du lit peut être estimé.

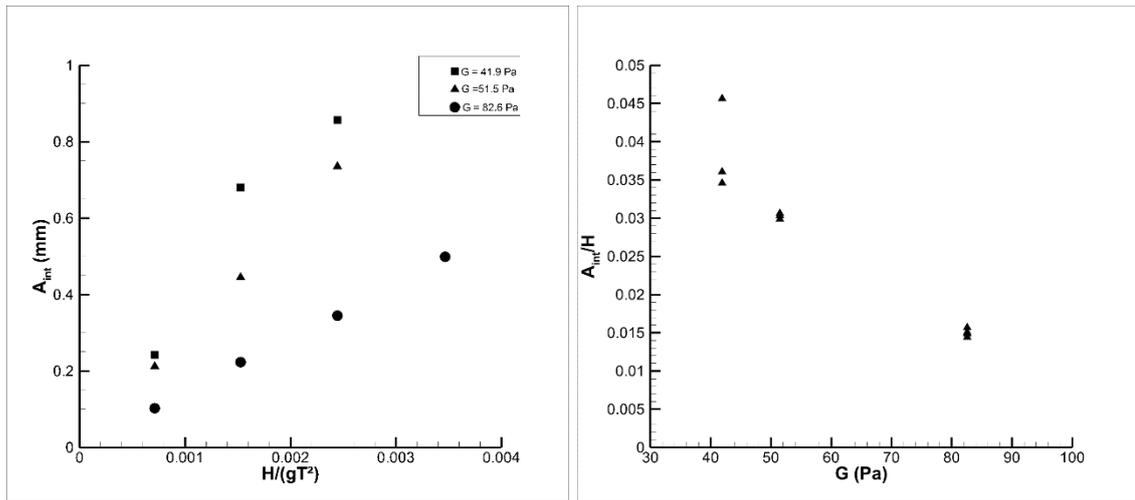


**Figure 8 Moyenne de phase sur les grandeurs de l'écoulement : (haut) surface libre (milieu) vitesse longitudinale dans l'écoulement (bas) vitesse longitudinale dans le matériau**

Dans un premier temps, l'amplitude de déformation verticale du lit,  $A_{int}$ , a été mesurée pour les différents cas étudiés. Cette mesure a été réalisée pour les trois concentrations de matériau étudiées et pour différentes amplitudes de vagues à une fréquence de 1 Hz. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Les cases grisées correspondent à des cas pour lesquels le lit de vase modèle a présenté un phénomène d'érosion par blocs et pour lesquels le déplacement vertical ne peut pas être déterminé. Nous remarquons que l'augmentation du module complexe semble retarder l'apparition du phénomène d'érosion. Pour les cas sans érosion, l'amplitude de déformation en fonction de l'amplitude des vagues est représentée sur la figure 9.a pour les trois matériaux. Pour les trois vases modèles, la déformation du lit augmente avec l'amplitude des ondes et donc avec les contraintes hydrodynamiques sur le fond. Cette déformation est plus importante pour les faibles modules complexes  $|G|$  représentant la rigidité du lit. La figure 9.b présente la déformation du lit adimensionnalisé par l'amplitude des vagues. Nous remarquons que pour les trois matériaux, le ratio  $A_{int}/H$  est relativement constant. Ce ratio diminue avec le module complexe.

**Tableau 1 Amplitude de déformation verticale du lit,  $A_{int}$  pour les trois concentrations de matériau et pour les différentes amplitudes de vague**

G(Pa)	$H/gT^2$	$A_{int}$ (mm)	$A_{int}/H$
41.900	0.0007	0.242	0.035
	0.0015	0.680	0.046
	0.0024	0.857	0.036
	0.0034		
51.500	0.0007	0.212	0.030
	0.0015	0.445	0.030
	0.0024	0.735	0.031
	0.0035		
	0.0046		
82.600	0.0007	0.102	0.015
	0.0015	0.223	0.015
	0.0024	0.345	0.014
	0.0035	0.499	0.015
	0.0045		



**Figure 9 (a) Amplitude de déformation verticale du lit,  $A_{int}$  pour les trois concentrations de matériau et pour les différentes amplitudes de vague (a) Amplitude de déformation verticale du lit adimensionnalisée par l'amplitude des ondes,  $A_{int}/H$**

Pour une amplitude des vague fixe, ici  $H=0.7$  mm, le déphasage entre la composante de vitesse longitudinale dans l'écoulement mesurée à mi-hauteur ( $y=h/2$ ) et la déformation longitudinale dans le matériau, noté  $\phi$ , a été estimé. Ces résultats sont présentés dans le tableau 2 et mis en relation avec l'angle  $\beta$  déterminé par l'étude rhéologique. Pour rappel, cet angle correspond au déphasage, entre la contrainte appliquée et la déformation résultante. Les valeurs estimées du déphasage entre le déplacement longitudinal de l'écoulement et du sédiment sont proches de  $180^\circ$ , donc en opposition de phase. On note que ce déphasage diminue quand l'angle  $\beta$  diminue. Ceci est à mettre en relation avec la définition de mesure de ce paramètre, c'est à dire le déphasage entre la contrainte appliquée sur le fond et la déformation résultante. Cette observation est à confirmer avec l'ensemble des cas de mesures. De plus, l'incertitude de mesure de ce déphasage reste à étudier en fonction de la résolution de la mesure PIV compte tenu de la faible fréquence d'acquisition.

**Tableau 2 Déphasage entre la composante de vitesse longitudinale dans l'écoulement mesurée à mi-hauteur ( $y=h/2$ ) et la déformation longitudinale dans le matériau**

$ G $ (Pa)	41.9	51.5	82.6
$\beta$ ( $^\circ$ )	3.37	2.98	2.9
$\phi$ ( $^\circ$ )	185.3	184.5	183.3

#### **IV – Conclusions et perspectives**

Cette étude a présenté une étude expérimentale innovante sur l'interaction entre un lit de matériau visco-elasto-plastique modélisant un vase et des ondes hydrodynamiques. Cette étude vise à mieux comprendre les phénomènes d'érosion d'un fonds marins cohésifs soumis à des vagues. Un vase modèle a été caractérisée rhéologiquement. Ce matériau présente des propriétés rhéologiques proches d'une vase naturelle avec l'avantage d'être transparente et de permettre un contrôle des paramètres rhéologiques. Une méthode expérimentale a été développée pour l'étude de l'interaction entre ce matériau et un écoulement transverse, et adaptée ici pour l'étude en présence de vagues. L'influence des caractéristiques rhéologiques du matériau et des propriétés des ondes (amplitudes) sur la réponse du lit a été étudiée. En particulier, il a été montré que l'amplitude des déformations verticales du lit est dépendante du module complexe de cisaillement du matériau. Le déphasage entre les déplacements du lit et de la colonne d'eau été relié à l'angle  $\beta$ . L'étude de l'ensemble du jeu de données, présentant également l'étude de la fréquence des vagues, va maintenant être réalisée et les résultats comparés aux données de la littérature et aux modèles théoriques (*Mei et Liu (1987), Maa et Mehta (1990)*).

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par le projet ANR-FQSM EMPHASE (Projet-ANR-19-FQSM-0003) et le programme MITACS à travers une bourse de mobilité.

## Références

- Grabowski, R. C., Droppo, I. G., & Wharton, G. (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 101-120.
- Lecostey P., Gomit G., Jarny S., Thomas L. (2022) Experimental study on the interactions between a turbulent flow and a bed of visco-elasto-plastic synthetic mud, *Experiments in Fluids* (in processing).
- Maa, J. P. Y., & Mehta, A. J. (1990). Soft mud response to water waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 116(5), 634-650.
- Méhauté, B. L. (1976). An introduction to water waves. In *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mei, C. C., & Liu, K. F. (1987). A Bingham-plastic model for a muddy seabed under long waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C13), 14581-14594.
- Mélinge, Y., Rangeard, D., Perrot, A., Serhal, S., Pierre, A., & Kaci, A. (2015, May). Etude du comportement visqueux-visco-plastique de suspensions sédimentaires multi-échelle. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*.
- Migniot, C., & Hamm, L. (1991). Consolidation and rheological properties of mud deposits. In *Coastal Engineering 1990* (pp. 2975-2983).
- Pedocchi, F., Martin, J. E., & García, M. H. (2008). Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(1), 183-186.
- Pouv, K. S., Besq, A., Guillou, S. S., & Toorman, E. A. (2014). On cohesive sediment erosion: a first experimental study of the local processes using transparent model materials. *Advances in water resources*, 72, 71-83.
- Shakeel, A., Kirichek, A., & Chassagne, C. (2021). Rheology of Mud: An Overview for Ports and Waterways Applications. *Sediment Transport-Recent Advances*.
- Tarhini, Z. (2016). *Étude couplée rhéométrie-hydrodynamique et application à l'érodabilité locale d'un sédiment cohésif modèle* (Doctoral dissertation, Poitiers).
- Zhang, M., Yu, G., La Rovere, A., & Ranzi, R. (2017). Erodibility of fluidized cohesive sediments in unidirectional open flows. *Ocean Engineering*, 130, 523-530.