



Impact de la turbidité sur la méthode de détection visuelle par corrélation d'image du seuil de mise en mouvement

MélanieVAH¹, ArmelleJARNO¹, François MARIN¹

1. LOMC, UMR 6294 CNRS, Université le Havre Normandie, 53 rue de Prony, 76600Le Havre, France.

melanie.vah@univ-lehavre.fr

Résumé :

La quantification de seuil de mise en mouvement est nécessaire pour l'estimation du transport sédimentaire. Ce seuil ne dépend pas uniquement des conditions d'écoulement et de la taille des grains considérée mais aussi de l'histoire de l'écoulement. Il est alors nécessaire de pouvoir détecter ce seuil de mise en mouvement des sédiments in-situ. L'impact de la turbidité sur la méthode de détection visuelle par corrélation d'images proposée par VAH *et al.*, (2022) est étudié. Les essais ont été réalisés dans un canal à courant unidirectionnel avec un sédiment homogène. La turbidité a été créée par ajout de kaolinite dans l'écoulement. Les résultats obtenus pour plusieurs turbidités sont comparés. Les limitations de la méthode sont discutées.

Mots-clés :

Transport sédimentaire, Turbidité, Seuil de mise en mouvement, Modélisation physique, Ecoulement unidirectionnel, Traitement d'images.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Les travaux sur l'étude, la quantification et la compréhension du seuil de mise en mouvement d'un fond sableux soumis à l'action d'un courant sont nombreux depuis ceux de Shields en 1936. Les critères de détermination du seuil de mise en mouvement sont très variés dans la littérature avec pour conséquence une forte dispersion des résultats et l'absence de consensus sur un critère ou une définition unique (PAHTZ *et al.*, 2020). Une nouvelle méthode de détection du seuil de mise en mouvement, basée sur une méthode visuelle, présentant l'avantage d'être complètement automatique a été développée récemment par VAH *et al.*, (2022). Cette méthode basée sur la technique de corrélation d'images permet de déterminer précisément et sans intervention humaine trois seuils correspondant respectivement au mouvement du premier grain, au début du transport par charriage et à l'initiation des structures sédimentaires.

PAPHITIS et COLLINS (2005) ont montré que le seuil de mise en mouvement ne dépendait pas uniquement de la taille et de la forme des grains mais également de l'histoire de l'écoulement. La détermination précise du seuil de mise en mouvement étant nécessaire à la quantification du transport par charriage, il devient primordial de pouvoir déterminer ce seuil directement in-situ.

La turbidité des écoulements à proximité des fonds sédimentaires est une donnée importante à prendre en compte lorsque l'on veut utiliser une méthode visuelle. La valeur de cette turbidité est variable en fonction du site d'étude. AMINOT *et al.*, (1997) rapporte qu'à quelques kilomètres à l'aval de l'embouchure de la Seine la turbidité est toujours inférieure à 16 NTU et même de l'ordre de 1 NTU en dehors des périodes de crue. Au large de la baie de Somme, le fond sédimentaire est constitué d'une grande quantité de sable fin et la turbidité reste faible n'impactant pas le travail des plongeurs (DURAFOUR, 2014). A l'inverse la turbidité dans la partie estuarienne de la Seine peut atteindre environ 90 NTU et jusqu'à 2000 NTU dans le bouchon vaseux (DRUINE, 2018).

L'objectif de cet article est de tester les limites de la méthode de détection des seuils de mise en mouvement développée par VAH *et al.*, (2022) dans le cadre d'écoulement turbide.

2. Protocole et conditions expérimentales

Les expériences sont menées au laboratoire LOMC, université Le Havre Normandie, dans un canal à courant de 10 m de long et 0,49 m de large (figure 1a). Le fond du canal est horizontal. La recirculation de l'eau est obtenue grâce à une pompe centrifuge. Le lit sableux, d'une hauteur de 1 cm, est situé entre $x=5$ m et $x=7$ m à l'aval du nid d'abeille situé à l'amont du canal, placé en $x=0$ m. La hauteur d'eau est fixée à $h=25$ cm au dessus du lit sableux. Un débitmètre à ultrasons Minisonic 600 permet l'enregistrement du débit à une fréquence de 1 Hz et d'obtenir la vitesse débitante dans la veine d'essai en temps réel. Le fond du canal est en PVC légèrement poncé sur toute la longueur afin d'obtenir une micro-rugosité homogène à l'amont du lit sableux. De manière à pouvoir détecter les

seuils de mise en mouvement, une caméra haute résolution Basler ace acA2500-60um équipée d'un objectif de 16 mm est placée latéralement au canal en $x=6,5\text{m}$. L'angle d'inclinaison de la caméra est fixé à $\alpha=60^\circ$ par rapport à la verticale (figure 1b). La caméra dispose d'un capteur de 2048x2592 pixels. La distance d correspond à la distance turbide parcourue (voir figure 1b). Trois spots LED de 50 W assurent un éclairage homogène de la zone d'étude (figure 1b). L'acquisition des images est réalisée grâce au logiciel Pylon à une fréquence de 2 Hz avec un temps d'exposition de 0,25s. Le post-traitement est effectué avec le logiciel Matlab.

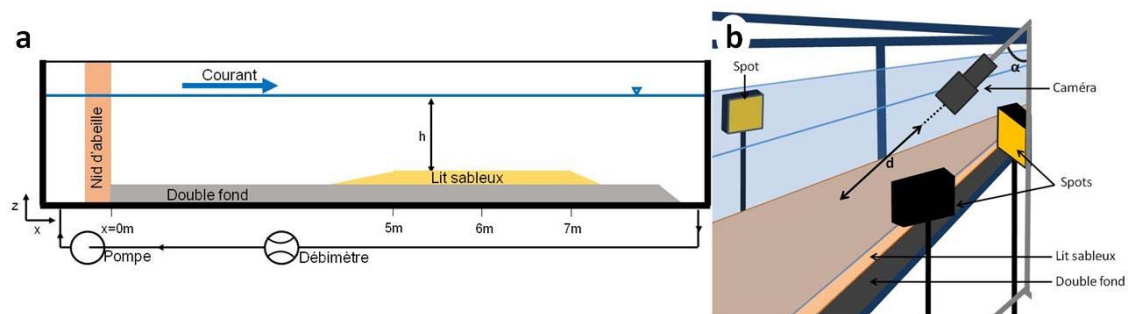


Figure 1. a) Schéma du dispositif expérimental. B) Schéma 3D de la zone d'essai avec la caméra et les spots.

Les tests ont été réalisés avec un sable homogène de diamètre médian $D_{50}=328\mu\text{m}$ et de densité 2,65. La turbidité de l'écoulement est obtenue en ajoutant de la kaolinite dans l'écoulement. Le diamètre médian des particules de kaolinite est de $7\mu\text{m}$ et la densité de 2550 kg/m^3 (BOUGOUIN *et al.*, 2022).

Le protocole expérimental est le suivant :

- Application d'une vitesse d'écoulement de 0,15 m/s dans le canal
- Ajout de kaolinite et maintien de la condition de vitesse pendant 10 min pour obtenir une homogénéisation de la turbidité dans l'écoulement
- Arrêt de l'écoulement, mélange et étalement du fond sableux
- Réalisation du test

La quantification du seuil de mise en mouvement est la même que dans VAH *et al.*, (2022). La rampe de courant utilisée a pour accélération $1,3\text{ mm/s}^2$. Durant la phase d'accélération les images sont enregistrées avec une fréquence de 2 Hz et simultanément la vitesse dans le canal est enregistrée via un débitmètre acoustique. Le courant est stoppé dès que le mouvement des grains est observé sur l'ensemble du fond sableux.

- Juste après l'arrêt du courant et donc au début de la phase de décélération, un prélèvement de 60 mL d'eau à environ 5 cm du fond juste à l'aval de la zone sableuse est effectué. Le prélèvement est réalisé avec une seringue.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- La mesure de la turbidité est effectuée à l'aide d'un turbidimètre TB 211 IR qui répond à la norme DIN EN ISO 7027 par rapport à la qualité de l'eau. Il s'agit d'un turbidimètre basé sur le principe néphélométrique avec une incertitude de 2,5% entre 0,1 et 500 NTU. Pour chaque échantillon, 3 mesures sont effectuées avec une ré-homogénéisation de celui-ci entre chaque mesure en prenant garde de ne pas injecter des bulles d'air dedans. La valeur de la turbidité retenue correspond à la moyenne des valeurs. L'écart type est d'environ 0,5 NTU.

3. Résultats

3.1 Impact de la turbidité sur la valeur des seuils de mise en mouvement et sur la corrélation

Trois seuils de mise en mouvement sont détectés lors de chaque test (VAH *et al.*, 2022) :

- Le seuil *nm* correspondant au mouvement du premier grain dans la zone
- Le seuil *bl* correspondant au seuil à partir duquel le transport sédimentaire par charriage devient significatif
- Le seuil *bf* correspondant au seuil à partir duquel des structures sédimentaires commencent à se former au fond

Les résultats des tests réalisés sont indiqués dans le tableau 1 et dans la figure 2. Ils sont comparés aux valeurs obtenues sans turbidité dans l'article VAH *et al.*, (2022).

Tableau 1. Synthèse des tests réalisés avec les valeurs des seuils obtenues.

Test	Turbidité	Seuil <i>nm</i> (m/s)	Seuil <i>bl</i> (m/s)	Seuil <i>bf</i> (m/s)	Δc
1	0,8 NTU	0,129	0,318	0,356	0,842
2	1,5 NTU	0,124	0,317	0,367	0,108
3	2,5 NTU	0,139	0,329	0,374	0,034
4	2,5 NTU	0,130	0,308	0,360	0,054
5	3 NTU	0,134	0,333	0,364	0,031
6	5,5 NTU	0,150	0,321	0,354	0,005
7	7 NTU	0,116	0,314	0,358	0,005
8	12 NTU	-	-	-	-
9	20 NTU	-	-	-	-
VAH <i>et al.</i> 2022	-	0,130 \pm 0,009	0,315 \pm 0,008	0,356 \pm 0,006	-

Les tests 3, 4 et 5 ont été réalisés avec des turbidités très proches. La variation de turbidité n'est pas significative entre ces trois tests.

Δc est défini comme la différence entre le niveau de corrélation au premier seuil *nm* et celui au seuil *bf*. L'évolution de Δc est interprétable car tous les essais ont été effectués dans les mêmes conditions. Il convient de noter que différents paramètres tels que la taille

de l'image considérée, l'éclairage, le nombre de pixels occupé par un grain ou encore le contraste entre les grains influent sur la perte de corrélation ce qui rend impossible son utilisation plus étendue dès que les conditions expérimentales changent. Les tests 8 et 9, réalisés avec une turbidité de 12 et 20 NTU respectivement, n'ont pas pu être traités en considérant la totalité des images acquises. La méthode de corrélation n'a pu être appliquée pour ces turbidités.

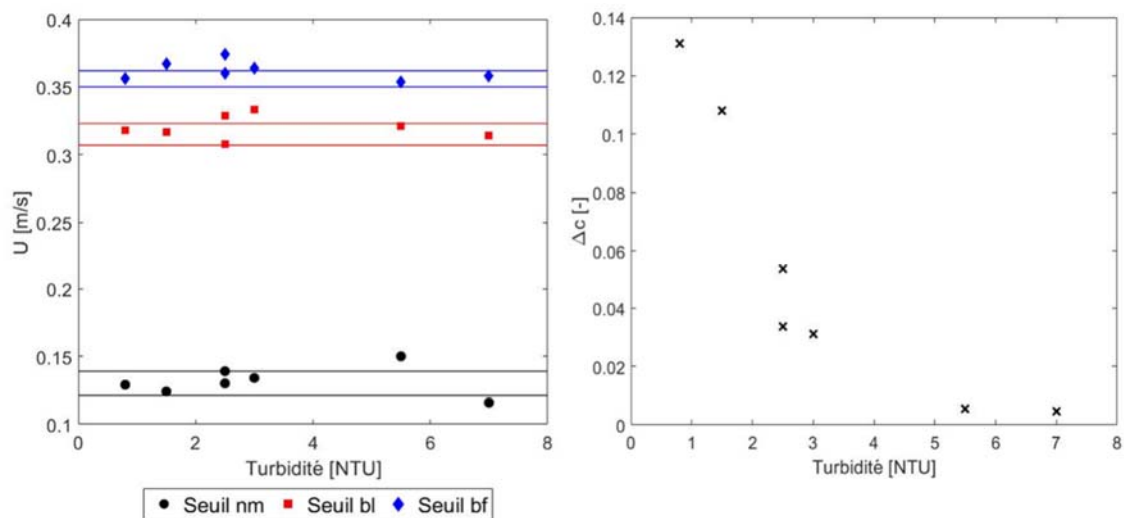


Figure 2. Vitesses moyennes pour les différents seuils et la différence de corrélation Δc obtenues pour les turbidités testées. Les lignes horizontales représentent pour chaque seuil les valeurs trouvées par Vah et al. 2022 pour un écoulement non-turbide.

La figure 2 montre que les valeurs des seuils détectées restent constantes pour toutes les turbidités. Cependant la différence entre la corrélation initiale et la corrélation finale, Δc , est de plus en plus faible quand la turbidité augmente. Pour les tests réalisés avec des fortes valeurs de turbidité (5,5 et 7 NTU, tests 6 et 7 (voir Tableau 1)), malgré une diminution de la différence de corrélation très réduite, il reste possible de déterminer les trois seuils de mise en mouvement. Toutefois, les incertitudes sur la détection des seuils augmentent notablement (voir figure 3). Afin de faciliter la détermination du seuil *bl*, dans les cas à forte turbidité, un lissage par moyenne mobile sur 40 valeurs a été effectuée (voir figure 3).

La méthode de détection des seuils de mise en mouvement proposée par VAH et al. (2022) est donc utilisable avec une turbidité allant jusqu'à 7 NTU dans les conditions expérimentales présentées ici et en considérant l'image entière. Quand la différence de corrélation devient très faible, pour les fortes valeurs de turbidité, une moyenne mobile appliquée aux valeurs de corrélation permet de réduire l'incertitude lors de la détection du seuil *bl*.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

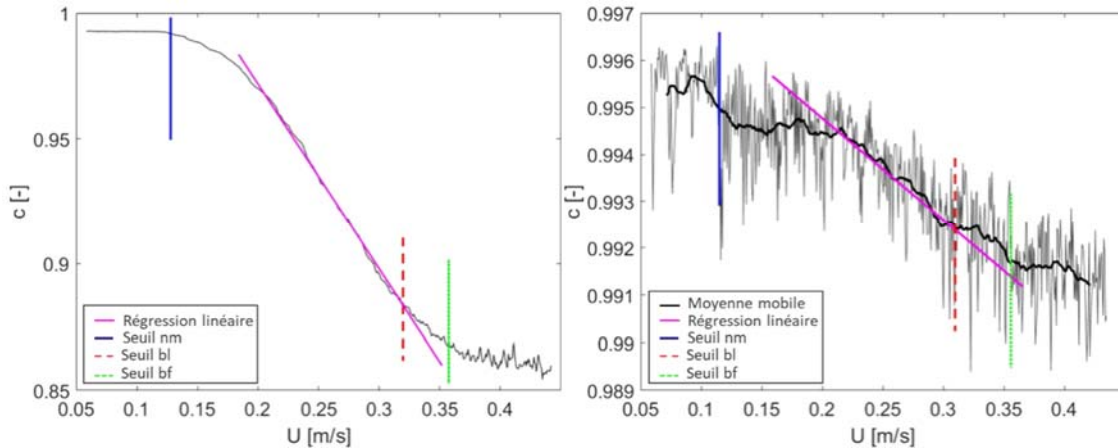


Figure 3. Gauche : corrélation obtenue pour le test 1 réalisé avec une turbidité de 0,8NTU. Droite : corrélation obtenue pour le test 7 réalisé avec une turbidité de 7NTU.

3.2 Impact de la distance turbide parcourue sur la capacité de détection des seuils de mise en mouvement

La distance turbide parcourue (d , figure 1b) joue un rôle important dans la détection des seuils de mise en mouvement par la méthode de corrélation. D'après les résultats présentés dans l'article de VAH *et al.*, (2022), une surface représentant 3 000 grains minimum est nécessaire et suffisante pour le calcul du seuil de mise en mouvement par corrélation d'image. Des zones de 1 cm dans la largeur du canal ont été considérées pour la suite de l'étude avec pour longueur environ 3,3 cm permettant d'obtenir 3 000 grains. Les zones situées au centre de l'image dans sa largeur sont au nombre de 29 permettant de couvrir toute la largeur du canal à l'exception des 10 cm les plus proches de chaque bord. Cette exclusion permet de s'affranchir des éventuelles perturbations dues aux effets de bord. La distance turbide parcourue, d , correspond à la distance entre la paroi du canal au niveau de l'objectif de la caméra et le centre de la zone considérée au fond (voir figure 1b).

La partie 3.1 a permis de montrer que la turbidité n'impactait pas la valeur des seuils mais seulement la valeur de Δc . La figure 4 montre donc l'évolution de la différence de corrélation en fonction de la distance turbide parcourue pour les tests 1, 5, 7, 8 et 9 (voir tableau 1). Une valeur de $\Delta c=0$ correspond à une impossibilité à définir la valeur des seuils de mise en mouvement.

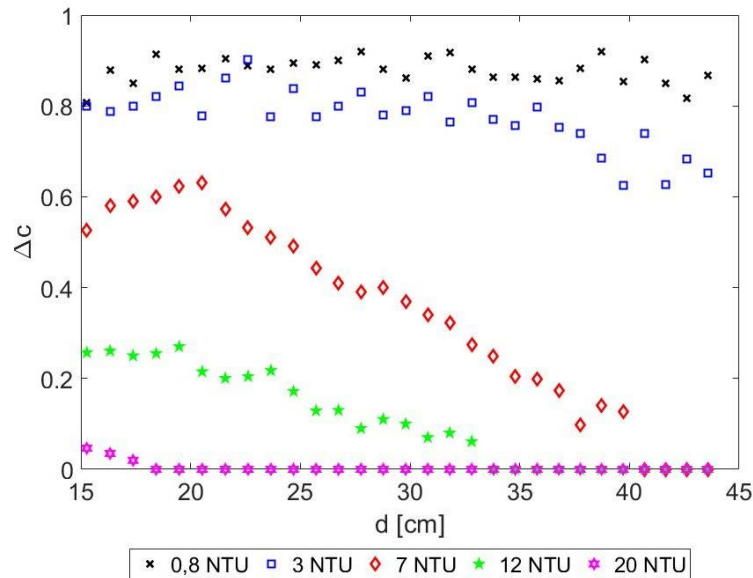


Figure 4. Evolution de la différence de corrélation Δc en fonction de la distance turbide parcourue d .

Pour une turbidité très faible (0,8 NTU, test 1), Δc est constant pour toutes les distances turbides parcourues. Quand la turbidité augmente, Δc diminue quand la distance turbide augmente. Pour les tests 7, 8 et 9, avec une turbidité respective de 7, 12 et 20 NTU, Δc devient trop faible à partir d'une certaine distance turbide et les seuils de mise en mouvement ne sont alors plus mesurables. De plus, pour les tests 8 et 9, les seuils de mise en mouvement n'étaient pas détectables en considérant l'image entière alors qu'en ne considérant que des zones de 3000 grains pour des distances turbides parcourues faibles, il est alors possible d'appliquer la méthode par corrélation d'image.

Pour une distance turbide parcourue fixée, Δc diminue quand la turbidité augmente.

Il apparaît donc important pour les fortes turbidités d'avoir une distance turbide parcourue faible et de ne considérer que la zone minimale de l'image permettant d'avoir 3000 grains.

4. Conclusions

La détection des seuils de mise en mouvement par la méthode de corrélation d'image est possible dans le cas des écoulements turbides. Cependant, cette méthode étant basée sur une acquisition d'images, son application reste limitée. Lorsque la détection est possible, la valeur des seuils n'est pas impactée par le niveau de turbidité.

Par ailleurs, la méthode de corrélation d'images a été validée par VAH *et al.*, (2022) sur des zones représentant la surface de 3000 grains. Ainsi, lorsque la turbidité ne permet pas de considérer l'intégralité de l'image acquise, la détection peut s'opérer sur une zone plus restreinte de l'image où la distance turbide parcourue est la plus petite permettant ainsi d'étendre la gamme de turbidité où la méthode est utilisable. La gamme de turbidité validée en laboratoire s'étend jusqu'à 20 NTU.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Ces essais menés en laboratoire permettent d'envisager une utilisation in-situ de la méthode dans certaines zones, par exemple en Manche où le niveau de turbidité ne dépasse généralement pas 5 NTU. Elle devrait pouvoir s'appliquer dans des zones où le niveau de turbidité atteint 20 NTU. Il convient de faire des essais en mer ou en rivière pour valider cette gamme.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre qui a financé cette étude via le projet TIGER.

6. Références bibliographiques

- AMINOT A., GUILLAUD J.F., KEROUEL R. (1997). *La baie de Seine: hydrologie, nutriments, chlorophylle (1978-1994)*. Plouzané, Ifremer. 148 p.
- BOUGOUIN A., BENAMAR A., JARNO A., MARIN F., PANTET A. (2022). *Rheological behaviour of pure clay and coarse-grained clay suspensions using an inclined blade vane-in-cup*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 300, 104714, <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2021.104714>
- DRUINE F. (2018). *Flux sédimentaire en estuaire de Seine : quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesure de turbidité (réseau SYNAPSES)*. PhD Thesis, Université de Normandie, 247p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00498/60966/>
- DURAFOUR M. (2014). *Dynamique sédimentaire en zone côtière dans le cas de sédiments hétérogènes : application au domaine côtier haut-normand*. PhD thesis, Université du Havre, France, 296p.
- PAHTZ T., CLARKA. H., VALYRAKIS, M., DURAN O. (2020). *The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments*. *Reviews of Geophysics*, Volume 58 (1), 58:e2019RG000679. <https://doi.org/10.1029/2019RG000679>
- PAPHITIS D., COLLINS M. (2005). *Sand grain threshold, in relation to bed 'stress history': an experimental study*. *Sedimentology*, 52(4):827_838, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2005.00710.x>
- VAH M., KHOURY A., JARNO A., MARIN F. (2022). *A visual method for threshold detection of sediment motion in a flume experiment without human interference*. *Earth Surface Processes and Landforms*. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.5346>