

Mise au point d'une technique expérimentale de détection du seuil de mise en mouvement

Alaa KHOURY ¹, Mélanie VAH ¹, Ellynn BOUVET ¹,
Armelle JARNO ¹, François MARIN ¹

1. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR CNRS 6294, Université Le Havre Normandie, 53, Rue Prony, CS 80 540, 76058 Le Havre, France.
alaa.khoury@univ-lehavre.fr ; melanie.vah@doct.univ-lehavre.fr ;
ellyn.bouvet@univ-lehavre.fr ; armelle.jarno-druaux@univ-lehavre.fr ;
francois.marin@univ-lehavre.fr

Résumé :

Le seuil de mise en mouvement des sédiments soumis à une sollicitation de type courant est une donnée nécessaire pour l'estimation du transport sédimentaire. Bien que l'énoncé du sujet de l'étude soit simple et son traitement relativement ancien, la détection expérimentale du seuil de mise en mouvement se révèle complexe et dépendante de multiples paramètres dont il n'est pas toujours facile d'estimer l'influence. Parmi ces paramètres, on peut citer le diamètre sédimentologique, le nombre de Reynolds du grain, la distribution granulométrique, la forme des sédiments et la turbulence de l'écoulement. Des premiers essais ont été réalisés dans un canal à courant unidirectionnel au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (UMR CNRS 6294) de l'Université Le Havre Normandie. Ils ont porté sur des sédiments homogènes. Le travail vise à comparer deux méthodes de détection du seuil de mise en mouvement, basées sur des opérations entre images de type différentiel ou corrélation d'images. Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la littérature. Un bon accord entre les valeurs mesurées du seuil et les valeurs estimées est obtenu.

Mots-clés :

Seuil de mise en mouvement, Canal à courant, Transport sédimentaire, Tri sédimentaire.

1. Introduction

Le seuil de mise en mouvement des sédiments a un impact sur le transport sédimentaire ainsi que sur la vitesse de migration. Il a de nombreuses applications dans des domaines très variés comme l'océanographie, la sédimentologie, la géologie ou encore la géochimie. La détermination de ce seuil apparaît donc comme primordiale et a fait l'objet de nombreuses études en laboratoire et sur le terrain depuis les travaux initiaux de Shields en 1936 (SOULSBY, 1997 ; RIEUX *et al.*, 2019 ; YANG *et al.*, 2019). Les méthodes utilisées pour la détermination de seuil de mise en mouvement des sédiments sont le plus souvent visuelles et conduisent donc à des estimations subjectives (DANCEY *et al.*, 2002). D'autres sont basées sur une extrapolation du transport sédimentaire à une valeur

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

faible (YALIN, 1972 ; PARKER *et al.*, 1982) ou nulle (VAN RIJIN, 1993). Ces méthodes sont néanmoins sensibles à la procédure d'extrapolation adoptée (DIPLAS, 1987). Par ailleurs, la définition du seuil de mise en mouvement peut aussi varier en fonction des auteurs.

Les formules les plus utilisées pour obtenir la valeur théorique du seuil de mise en mouvement sont des formules empiriques utilisant le nombre de Shields qui correspond au ratio entre la force de frottement et la force de gravité réduite. La première formulation permettant de calculer le nombre de Shields critique de mise en mouvement des sédiments a été proposée par Shields en 1936, Cette formulation a ensuite été modifiée par SOULSBY (1997) pour permettre un meilleur ajustement dans le cas des sédiments fins :

$$\theta_c = \frac{0,3}{1+1,2 D_*} + 0,055 (1 - \exp(-0,02 D_*)) \quad (1)$$

où D_* désigne le diamètre sédimentologique défini par :

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} D_{50} \quad (2)$$

Le seuil de mise en mouvement des sédiments peut être aussi exprimé avec le nombre de mobilité Λ à la place du paramètre de Shields. Ce nombre sans dimension représente le ratio entre la vitesse de frottement au fond et la vitesse de sédimentation des particules. Cette approche a été utilisée par plusieurs auteurs (PAPHITIS, 2001 ; BEHESHTI & ATAIE-ASHTIANI, 2008 ; SIMÕES, 2014). La formule empirique proposée par SIMÕES (2014) pour la détermination du seuil critique de mise en mouvement par l'intermédiaire du nombre de mobilité en fonction du diamètre sédimentaire adimensionnel est la suivante :

$$\Lambda_c = 0,215 + \frac{6,79}{D_*^{1,70}} - 0,0750 \exp(-2,62 \cdot 10^{-3} D_*) \quad (3)$$

Dans le cadre de ces premiers tests, les essais ont été effectués sur des sédiments homogènes bien triés. L'objectif est la mise au point d'une technique pour la détection du seuil de mise en mouvement de manière automatisée.

2. Matériel et méthodes

2.1 Conditions et techniques expérimentales

Les essais sont conduits dans un canal à courant unidirectionnel au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (UMR CNRS 6294) de l'Université Le Havre Normandie. Le canal a une longueur de 10,7 m, une largeur de 0,49 m et une hauteur de 0,5 m. Le courant est généré par une pompe centrifuge MUTHEC. Un débitmètre à ultrasons Minisonic 600 est installé au niveau du tuyau de recirculation sous le canal. Il 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. À l'une des extrémités du canal est installé un nid d'abeille permettant d'homogénéiser l'écoulement. Le fond du canal est en PVC ; il a été légèrement poncé

sur toute la longueur du canal pour créer une micro-rugosité sur le fond. Les parois vitrées du canal permettent la visualisation du fond sableux et la mise en œuvre de techniques de mesure optique. L'ensemble du dispositif expérimental est schématisé dans la figure 1.

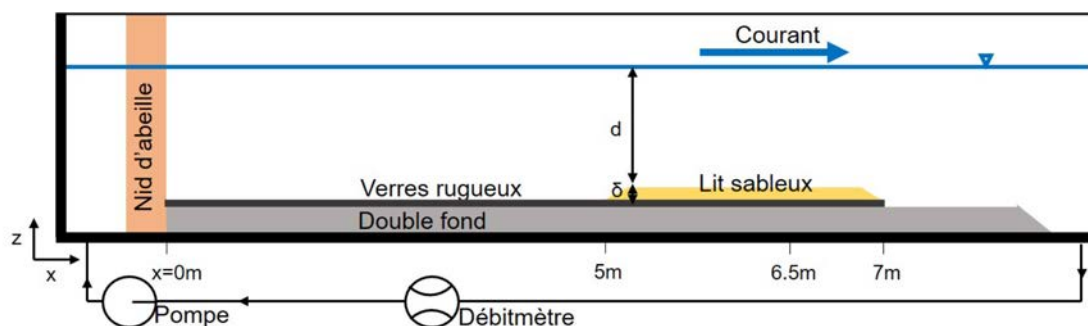


Figure 1. Schéma du canal expérimental.

Les tests ont été réalisés avec deux sables différents. Les sables S₁₁₉ et S₃₅₈ sont des sables de carrière de diamètre médian $D_{50} = 119 \mu\text{m}$ et $D_{50} = 358 \mu\text{m}$ respectivement. Chacun des sables peut être considéré comme bien trié selon le critère de SOULSBY (1997). L'épaisseur moyenne de sable est de 0,008 m et la hauteur d'eau au-dessus du lit sédimentaire est fixée à 0,25 m. La zone étudiée est située entre $x = 5 \text{ m}$ et $x = 7 \text{ m}$ à l'aval du nid d'abeille (voir figure 1). L'écoulement dans ce canal est établi à partir de $x = 3,5 \text{ m}$. Les tests réalisés simulent des conditions de disponible illimité (VAH *et al.*, 2020). Quatre essais ont été réalisés pour chacun des sables.

De manière à pouvoir détecter les seuils de mise en mouvement, une caméra haute résolution Basler Ac2040-180km équipée d'un objectif de 55 mm est placée latéralement au canal en $x=6,5 \text{ m}$. L'angle de l'inclinaison de la caméra est fixé à 45 degrés et la distance entre la caméra et le canal est de 0,4 m, de manière à viser la zone centrale du canal. La surface vue par la caméra est de l'ordre de 15cmx15cm. La caméra ayant un nombre de pixels de 2048x3032, la résolution est de 70 $\mu\text{m}/\text{pix}$, valeur inférieure au diamètre des sables utilisés. Trois spots LED de 50W assurent un éclairage homogène de la zone d'étude. L'acquisition des images est réalisée grâce à l'utilisation de trois logiciels différents : Matrox intellicam qui pilote la carte graphique, Pylon 5 permettant de régler les paramètres d'acquisition et Streampix 5 MultiCam pour l'enregistrement des images. La fréquence d'acquisition choisie est de 2 Hz. Ces images sont ensuite traitées par le logiciel Matlab.

Au début de chaque test, le sable est étalé sur la zone d'étude avec une précision au millimètre. Une phase d'accélération constante du courant est appliquée dans le canal. Cette phase est suffisamment longue pour une détection précise du mouvement des grains et suffisamment rapide pour ne pas influencer sur les résultats obtenus. Entre deux images acquises, le débit varie de 0,363 L/s. Simultanément à l'acquisition de cette rampe d'accélération, le mouvement des grains est enregistré.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

2.2 Méthodes de détection du seuil de mise en mouvement

Il existe plusieurs seuils de mise en mouvement des sédiments. Dans cette étude, on s'intéresse d'une part à la détection de la mise en mouvement du premier grain (Seuil A) et d'autre part à la mise en mouvement continue et homogène des grains (Seuil B) dans la zone d'étude. Dans le cadre de ce travail, deux techniques d'analyse des images du fond sédimentaire sont mises en œuvre pour déterminer ces deux seuils de mise en mouvement.

2.2.1 Méthode 1 : méthode par différentiel d'images

Les images enregistrées sont transformées en matrices avec pour valeur de chaque indice, le niveau de gris du pixel correspondant. Les matrices intensité I successives sont notées I_m . Pour chaque itération successive, une différence entre les matrices m et $m+1$ est effectuée :

$$D_m = |I_{m+1} - I_m| \text{ pour } m \geq 0 \quad (4)$$

Pour chaque matrice différence D_m obtenue, on extrait une première information : la valeur maximale de l'ensemble des coefficients. Une valeur de base de l'ordre de 15 sur l'échelle des niveaux de gris résulte du bruit ambiant lors de l'acquisition des images avant qu'aucun mouvement ne soit détecté. Au contraire, une variation significative du niveau de gris entre deux images successives résulte d'un mouvement de grains.

Le premier saut significatif dans la valeur du maximum d'intensité détecté entre deux matrices D_m correspond au seuil A interprété comme le mouvement significatif du premier grain (voir figure 2a). Le bruit moyen est estimé en calculant la moyenne des valeurs maximales de chaque matrice D_m pour $m < \text{seuil A}$.

Un second seuil peut être défini. Pour la détermination, toutes les valeurs des matrices $D_m < \text{bruit}$ sont mises à zéro et le nombre de termes non nuls de chaque matrice D_m est calculé puis tracé en fonction de l'indice m (voir figure 2b). Une moyenne mobile est effectuée pour chaque m sur les 10 valeurs précédentes et les 10 suivantes, valeur optimisée pour lisser les petites variations d'intensité. Après la détection du seuil A, on observe une phase de mouvement par bouffées qui correspond à des départs de grains isolés instables suivis d'un retour à un état de fond quasi-immobile. Le deuxième seuil de mouvement, noté seuil B, situe le moment où la moyenne mobile passe d'une valeur faible à une valeur continûment croissante (voir figure 2b). Ce seuil correspond au mouvement d'ensemble des grains. Il est identifié comme le seuil de mise en mouvement moyen de la population de grains placée sur le fond. Un pointage sous Matlab permet d'acquérir l'indice m_{SB} correspondant au seuil. Il est ensuite mis en lien avec la rampe d'accélération acquise simultanément pour transformer cet indice en vitesse de mise en mouvement. Le temps total de post-traitement peut être estimé à environ 3 min par test, en présence d'un opérateur pour détecter la position du seuil.

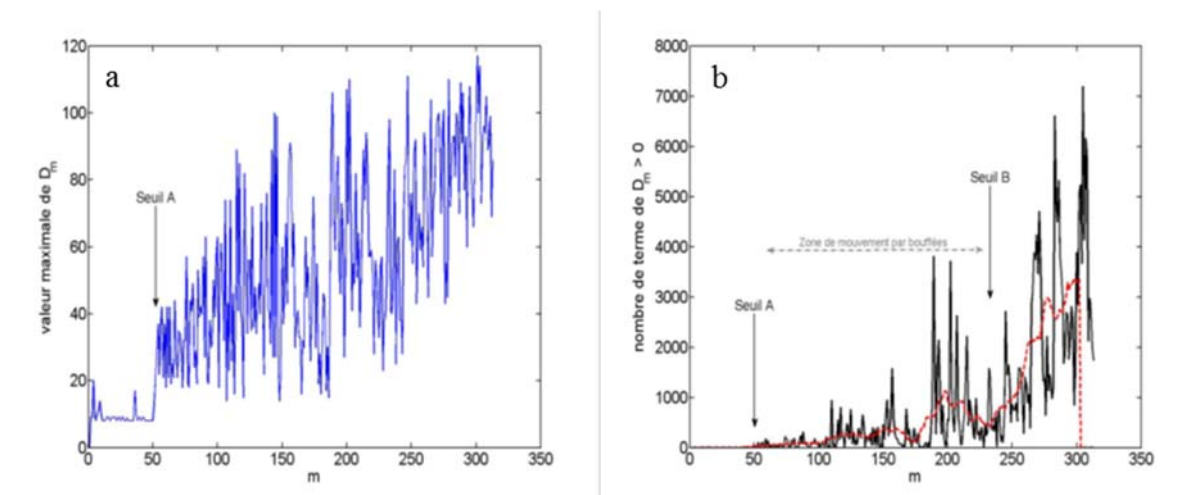


Figure 2. Exemple de traitement par différentiel d'images. (a) Valeur maximale des coefficients de la matrice différence D_m en fonction de m ; (b) Nombre de termes non nuls des matrices D_m successives en fonction de m . La ligne pointillée rouge correspond au lissage par moyenne mobile.

2.2.2 Méthode 2 : méthode par corrélation d'images

Une corrélation des images successives du test avec la première image est effectuée. Cette corrélation s'effectue en utilisant la fonction `corr2` du logiciel Matlab. Elle permet de quantifier globalement la différence entre deux images. Un taux de corrélation égal à 1 signifie que les deux images sont identiques alors qu'un taux de corrélation égal à 0 signifie que les deux images sont totalement différentes. La figure 3 montre un exemple du taux de corrélation obtenu en fonction du débit pour un des essais réalisés avec le sable S₁₁₉. Après une zone où le taux de corrélation est constant, la courbe de corrélation se présente sous forme d'une chute qui peut être caractérisée par un ajustement linéaire. Le taux de décorrélation τ_d est défini par :

$$\tau_d = a_{\text{corr}} * Q + b_c \quad (5)$$

où a_{corr} est le coefficient directeur [s/L] et b_c est le coefficient adimensionnel.

Avant qu'il y ait mouvement, le taux de corrélation est constant et élevé (autour de 0,94) puisque les images sont quasi-identiques. Lorsque le taux de corrélation commence à chuter, le seuil A est détecté.

L'estimation du seuil B est effectuée en fixant un taux de décorrélation de 20% à $\pm 5\%$ par rapport au niveau de corrélation mesuré avant mouvement des grains. Ce taux est choisi pour considérer une perte de corrélation significative sans qu'elle soit non plus trop grande.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

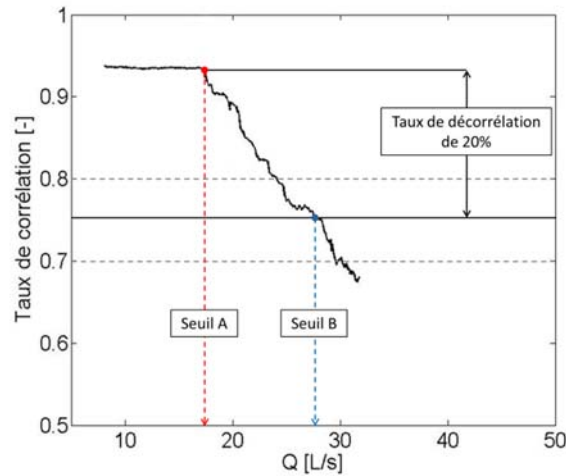


Figure 3. Exemple de détermination des seuils A et B à partir du taux de corrélation en fonction du débit pour un des essais réalisés avec le sable S_{119} . La ligne horizontale continue correspond à un taux de décorrélation de 20%. Les lignes en pointillés gris correspondent à un taux de décorrélation de 15 et 25% respectivement. La ligne en pointillés rouge correspond au meilleur ajustement linéaire de la zone de décroissance du taux de corrélation ($R^2=0,96$).

3. Résultats

Pour chacun des deux sables, les 4 essais sont utilisés pour obtenir valeur moyenne et écart-type pour les deux méthodes et les deux seuils détectés (voir tableau 1). Tout d'abord, on constate comme attendu que les débits-seuils mesurés pour le sable S_{358} sont plus élevés que pour le sable S_{119} de plus faible diamètre. Les résultats obtenus avec les deux méthodes sont proches, ce qui se traduit par des écarts-types faibles pour les deux seuils et les deux sables étudiés.

Tableau 1. Comparaison des débits seuils moyens et écarts-types pour les deux sables étudiés et les deux méthodes de détection du seuil de mise en mouvement.

Sable	Seuil	Méthode		écart-type	Sable	Seuil	Méthode		écart-type
		1	2				1	2	
S_{119}	A (L/s)	16,69	16,09	0,43	S_{358}	A (L/s)	17,89	17,98	0,06
	B (L/s)	23,25	21,69	1,10		B (L/s)	33,26	31,13	1,50

Les débits-seuils mesurés permettent de déterminer le nombre de Shields critique et le nombre de mobilité critique pour comparer aux formulations de la littérature proposées par SOULSBY (1997) (Eq. 1) et SIMÕES (2014) (Eq. 3) (voir tableau 2). Le calcul de θ_c est effectué en considérant la contrainte au fond avec $k_s = 2,5D_{50}$. Les seuils calculés avec

les formules de la littérature traduisent l'instabilité globale du lit sédimentaire ; ils sont donc à rapprocher du seuil B estimé expérimentalement.

Il apparaît clairement que l'estimation expérimentale de θ_c et Λ_c dépend très peu de la méthode utilisée. De plus, les résultats montrent un accord moyen entre les valeurs expérimentales et la formulation de SOULSBY (1997) (Eq. 1). Pour le sable fin S₁₁₉, l'écart estimé est de l'ordre de 45%. Le seuil de mise en mouvement est atteint expérimentalement pour une contrainte au fond plus faible que celle prédite par la formule de Soulsby. Par contre, un meilleur accord est obtenu pour le sable le plus gros S₃₅₈ (4,4% et 13,9% d'écart respectivement pour les méthodes 1 et 2). Concernant la comparaison avec la formule de SIMÕES (2014) (Eq. 3), les valeurs mesurées sont proches des valeurs estimées. L'écart est de l'ordre de 18% pour le sable S₁₁₉ et inférieur à 7% pour le sable S₃₅₈.

Tableau 2. Comparaison entre les valeurs de seuil B mesurées avec méthode 1 et 2 et les valeurs obtenues avec les formulations de SOULSBY (1997) et SIMÕES (2014) pour les deux sables utilisés.

<i>Sable</i>	<i>Méthode</i>	θ_c Estimé (SOULSBY, 1997)	θ_c Mesuré	<i>Err%</i>	Λ_c Estimé (SIMÕES, 2014)	Λ_c Mesuré	<i>Err %</i>
S ₁₁₉	1	0,068	0,038	44,2	1,18	0,98	17,1
	2		0,037	46,3		0,95	19,7
S ₃₅₈	1	0,034	0,033	4,4	0,30	0,32	6,4
	2		0,030	13,9		0,31	1,0

4. Conclusions

La détection du seuil de mouvement résulte encore souvent d'une observation à l'œil où le caractère subjectif ne peut être exclu. Des premiers résultats concernant le développement de deux techniques nouvelles de détection sont présentés. Les premiers résultats obtenus sur deux sables homogènes sont prometteurs avec les deux techniques testées : l'une basée sur des différences d'images et l'autre sur de la corrélation d'images. Les seuils mesurés sont cohérents avec les valeurs attendues par les formulations de la littérature. L'objectif étant d'atteindre à terme une détection automatique et précise du seuil d'entraînement du fond sédimentaire, la méthode basée sur la corrélation d'images paraît plus adaptée. Il convient de poursuivre les essais pour tester la robustesse des méthodes développées en étudiant l'influence de paramètres externes tels que la taille du champ visé, l'éclairage et l'orientation de la caméra. Le passage à des populations granulométriques complexes (formes variées, granulométries étendues...) sera envisagé par la suite.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

5. Références bibliographiques

- BEHESHTI A., ATAIE-ASHTIANI B. (2008). *Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement*. Coastal Engineering, Vol. 55(5), pp 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.01.003>
- DANCEY C.L., DIPLAS P., PAPANICOLAOU A., BALA M. (2002). *Probability of individual grain movement and threshold condition*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128(12), pp 1069-1075. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:12\(1069\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:12(1069))
- DIPLAS P. (1987). *Bedload transport in gravel-bed streams*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113(3), pp 277-292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:3(277))
- PAPHITIS D. (2001). *Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves*. Coastal Engineering, Vol. 43(3-4), pp 227-245. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00015-1)
- PARKER G., DHAMOTHARAN S., STEFAN H. (1982). *Model experiments on mobile, paved gravel bed streams*. Water Resources Research, Vol. 18(5), pp 1395-1408. <https://doi.org/10.1029/WR018i005p01395>
- RIEUX A., WEILL P., MOUAZE D., POIRIER C., NECHENACHE F., PEREZ L., TESSIER B. (2019). *Threshold of motion and settling velocities of mollusc shell debris: Influence of faunal composition*. Sedimentology, Vol. 66, pp 895-916. <https://doi.org/10.1111/sed.12521>
- SHIELDS A. (1936). *Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung*. Thèse Université technique de Berlin.
- SIMÕES F.J. (2014). *Shear velocity criterion for incipient motion of sediment*. Water Science and Engineering, Vol 7(2), pp 183-193. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006>
- SOULSBY R. (1997). *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford, London.
- VAH M., JARNO A., LE BOT S., FERRET Y., MARIN F. (2020). *Bedload transport and bedforms migration under sand supply limitation*. Environmental Fluid Mechanics, Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09738-6>
- VAN RIJN L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua publications, Amsterdam, Vol. 1006.
- YALIN M. (1972). *On the formation of dunes and meanders*. Hydraulic Research and its Impact on the Environment.
- YANG Y., GAO S., WANG Y. P., JIA J., XIONG J., ZHOU L. (2019). *Revisiting the problem of sediment motion threshold*. Continental Shelf Research, Vol. 187, 103960. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103960>