

PUMP EROSION TEST : UN ÉRODIMÈTRE “LOW COST” DE TERRAIN

PUMP EROSION TEST : A LOW COST FIELD ERODIMETER

F. LARRARTE^(1,2), C. CHEVALIER⁽¹⁾, C. MINATCHY⁽¹⁾, H. CHOLLET⁽³⁾
*frederique.larrarte@univ-eiffel.fr; christophe.chevalier@univ-eiffel.fr; carlos.minatchy@univ-
eiffel.fr; hugues.chollet@univ-eiffel.fr*

⁽¹⁾ Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

⁽²⁾ Laboratoire d'Hydraulique Saint Venant – 6 quai Watier 78401 Chatou, France

⁽³⁾ Univ Gustave Eiffel, COSYS-GRETTIA, F-77454 Marne-la-Vallée, France

Résumé

Le PumpET (Pump Erosion Test) est un matériel de terrain dédié à la mesure de l'érodabilité de sédiments immergés. Après un rappel d'une partie des nombreux érodimètres existants, nous présenterons les principales étapes d'élaboration du prototype du PumpET et les résultats des premières campagnes expérimentales avant de conclure par les perspectives pour faire évoluer ce prototype.

Summary

The PumpET (Pump Erosion Test) is a field device dedicated to measuring the erodibility of submerged sediments. After a review of some of the many existing erodimeters, we will present the main steps in the development of the PumpET prototype and the results of the first experimental campaigns before concluding with the prospects for further development of this prototype.

I – Introduction

L'érosion par l'eau est un phénomène naturel qui peut avoir une forte influence sur la stabilité des structures de génie civil. De nombreuses tentatives ont été faites pour mesurer la sensibilité à l'érosion (l'« érodabilité ») au travers de grandeurs pouvant caractériser ces phénomènes notamment la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion. L'objectif ici est de proposer un matériel de terrain « low cost » permettant de générer et caractériser l'érosion de sédiments présents sous quelques décimètres d'eau. Par « sédiments », nous entendons les matériaux constitutifs ou déposés au fond d'une rivière, d'un port, d'un canal et constitués d'éléments organiques ou minéraux, cohésifs ou non. Par « appareil de terrain », nous visons un matériel léger, autonome, aisé à transporter à la main le long d'un cours d'eau ou d'un estran, et sous l'appellation « low cost » : peu onéreux, facile à fabriquer et à réparer.

Le PumpET (Pump Erosion Test) vise à être un matériel de terrain dédié à la mesure de l'érodabilité, définie comme la capacité des sédiments fluviaux en place à pouvoir s'éroder sous différentes conditions hydrauliques. Son principe fondateur est l'aspiration d'eau en aval d'un canal d'essai immergé posé sur un lit sédimentaire. L'aspiration permet de générer à l'intérieur du canal un écoulement unidirectionnel contrôlé en vue d'éroder le sédiment. Le phénomène érosif se déclenche lorsque la contrainte critique de mise en mouvement des grains dans la zone d'essai est atteinte. Pour cela, l'évolution spatiale et temporelle de la déformée (en mm) de la surface de sédiment enclos dans la section de mesure sera suivie. Des mesures turbidimétriques pourraient être envisagées mais leur mise en place nécessite de prendre en compte la masse et l'encombrement dus aux capteurs. Au cours de l'essai d'érodabilité, les eaux de pompage pourront être récupérées afin d'analyser en laboratoire la granularité et la fraction organique des sédiments érodés.

Après un rappel d'une partie des nombreux érodimètres existants, nous présenterons les principales étapes d'élaboration du prototype du PumpET, les difficultés surmontées, et les résultats des premières campagnes expérimentales.

II – Etat de l'art et aperçu des dispositifs existants

L'érosion est communément entendue comme la mise en mouvement d'un solide sous l'effet de la contrainte de cisaillement que l'écoulement exerce sur l'interface sédiment-eau. Une contrainte de cisaillement minimale, également appelée contrainte de cisaillement critique τ_c , est nécessaire pour éroder les sédiments.

Depuis [1], qui proposa une loi basée sur la pente du lit et la hauteur d'eau, de nombreux auteurs ont proposé des lois dont [2] ont montré une comparaison graphique alors que [3, 4] faisaient des états de l'art des travaux sur le seuil d'érosion. Ces travaux montrent la difficulté à prévoir la résistance d'un sédiment donné à un phénomène érosif, ce qui n'est guère étonnant si l'on se réfère au panel de propriétés physico-chimiques mises en jeu [5].

Abordant la question de la quantification de l'érosion ou du seuil d'érosion sous un autre angle, de nombreux collègues ont proposé des appareils pour des travaux soit de laboratoire soit de terrain [2] et [6] a montré que le seuil de contrainte de cisaillement est fortement dépendant de l'appareil utilisé. Plus récemment, [7] a proposé un appareil de terrain utilisant une hélice mais dont l'impact spatial est peu documenté alors que [8] proposait un appareil dit de terrain mais nécessitant un prélèvement au préalable, ce qui peut modifier les caractéristiques du sédiment. En parallèle de nos travaux, [9] a proposé un appareil mettant en œuvre une chambre d'érosion qui est posée sur le sédiment.

III – Développement du prototype

Un bilan des précédents projets montre que les dispositifs expérimentaux de terrain étaient assez peu voir non transportables et d'un encombrement significatif. En revenant aux fondamentaux, le but est de disposer d'un appareil facilement portable, autonome et léger. Pour cela on a réduit la chambre d'observation à une veine de faible section, afin de réduire la puissance de la pompe nécessaire à atteindre les vitesses visées, mais aussi la taille de la batterie d'alimentation de cette pompe. Enfin, on a pris l'option d'un matériel à coût réduit en utilisant des composants aisément trouvables dans le commerce, par exemple nous utilisons de la tuyauterie PVC standard de 40 mm de diamètre se raccordant sur une veine de section en Altuglass.

Le PumpET est un dispositif compact, pesant moins de 3 kg, dont le coût est inférieur à 1000 euros (hors main d'œuvre). Il convient de noter que quelques astuces initiales ont été mises en œuvre pour améliorer la mesure :

- la chambre de mesure est de section variable (figure 1). L'entrée (80 x 30 mm) est d'une section double de la sortie. L'évolution de la vitesse moyenne est pratiquement linéaire le long de la chambre, l'idée étant que le déclenchement devrait apparaître en aval où la vitesse est la plus importante, la position du seuil d'érosion le long de la chambre permettrait de déterminer une vitesse précise de déclenchement ;
- une caméra sportcam filme la chambre pendant les phases de pompage, cela permet de déterminer la mise en mouvement des sédiments ;
- deux plans laser inclinés de 45° sont projetés à travers la paroi supérieure transparente de la chambre de mesure. Leur déformation devrait permettre mesurer le creusement de la chambre (figure 2) ;
- La pompe immergée est centrifuge (figure 3), elle permet d'assurer une vitesse moyenne de 0,7 m/s à la puissance maximale en 12V (c'est une 1100 GPH). Elle est pilotée en paliers de puissance (PWM) avec un micro-contrôleur ;

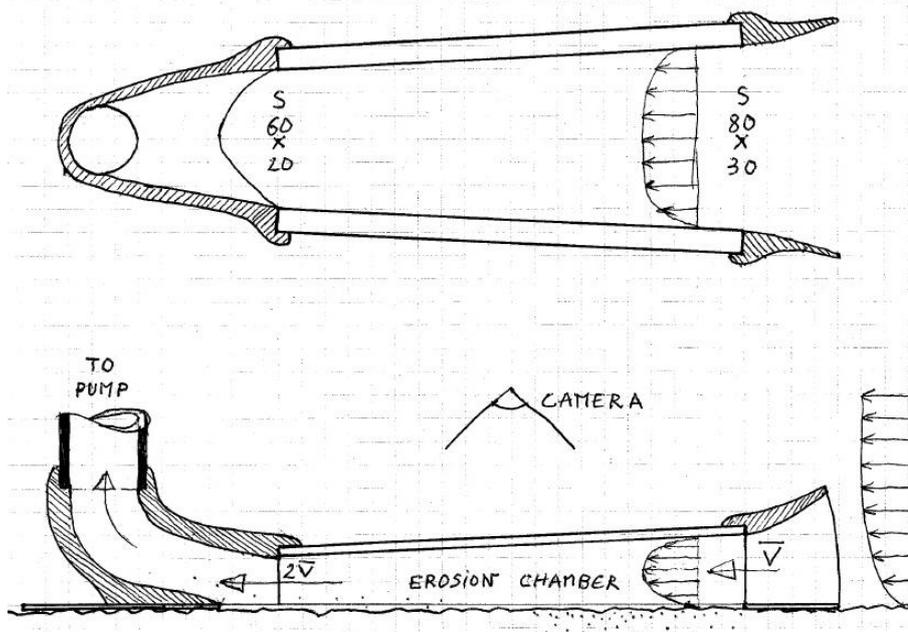


Figure 1 – Schéma de principe de la chambre de mesure

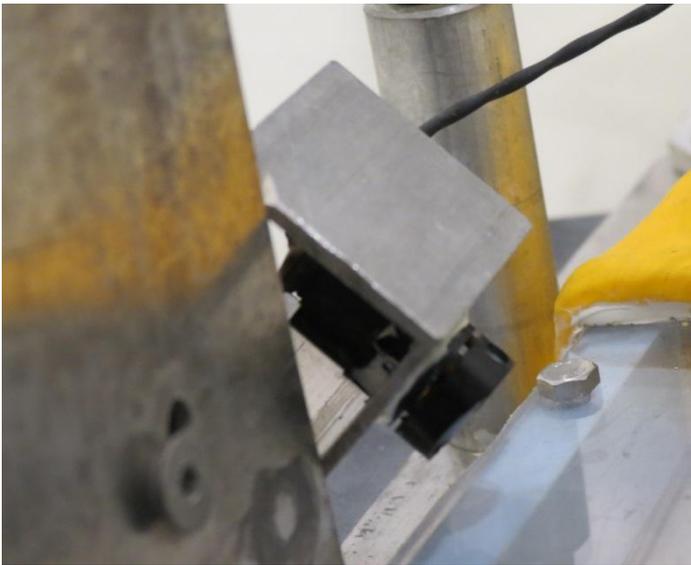


Figure 2 : Une des têtes de plan laser dans son tube de montage usiné à 45°



Figure 3 : Pompe et son positionnement à la verticale

D'un point de vue de la détermination de l'érosion, la pompe génère un courant dans la chambre de mesure. Cette chambre est filmée afin de déterminer si, pour un débit donné, les grains emprisonnés dans la chambre sont mis en mouvement ou pas.

III – Tests préliminaires et calibration de la pompe

III – 1 Calibration de la pompe

La puissance de la pompe se contrôle en PWM : Pulse Width Modulation. Ce paramètre numérique varie de 1 à 256. La calibration a été faite au laboratoire dans une cuve en eau calme. Nous avons fait varier la puissance de la pompe et mesuré le volume débité pendant 10 secondes pour chaque palier de puissance. Connaissant la section de la chambre, nous pouvons en déduire la vitesse (figure 4) de l'écoulement à l'endroit le plus étroit (aval de la chambre).

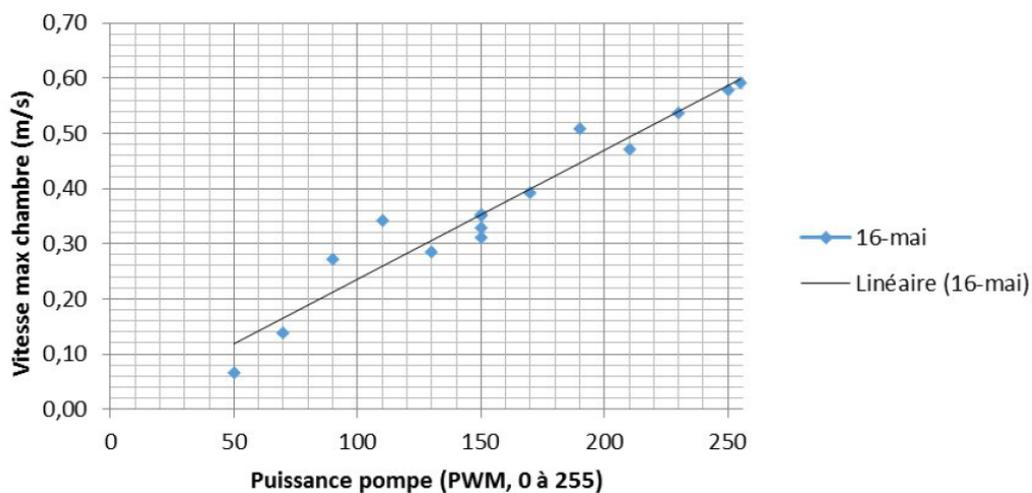
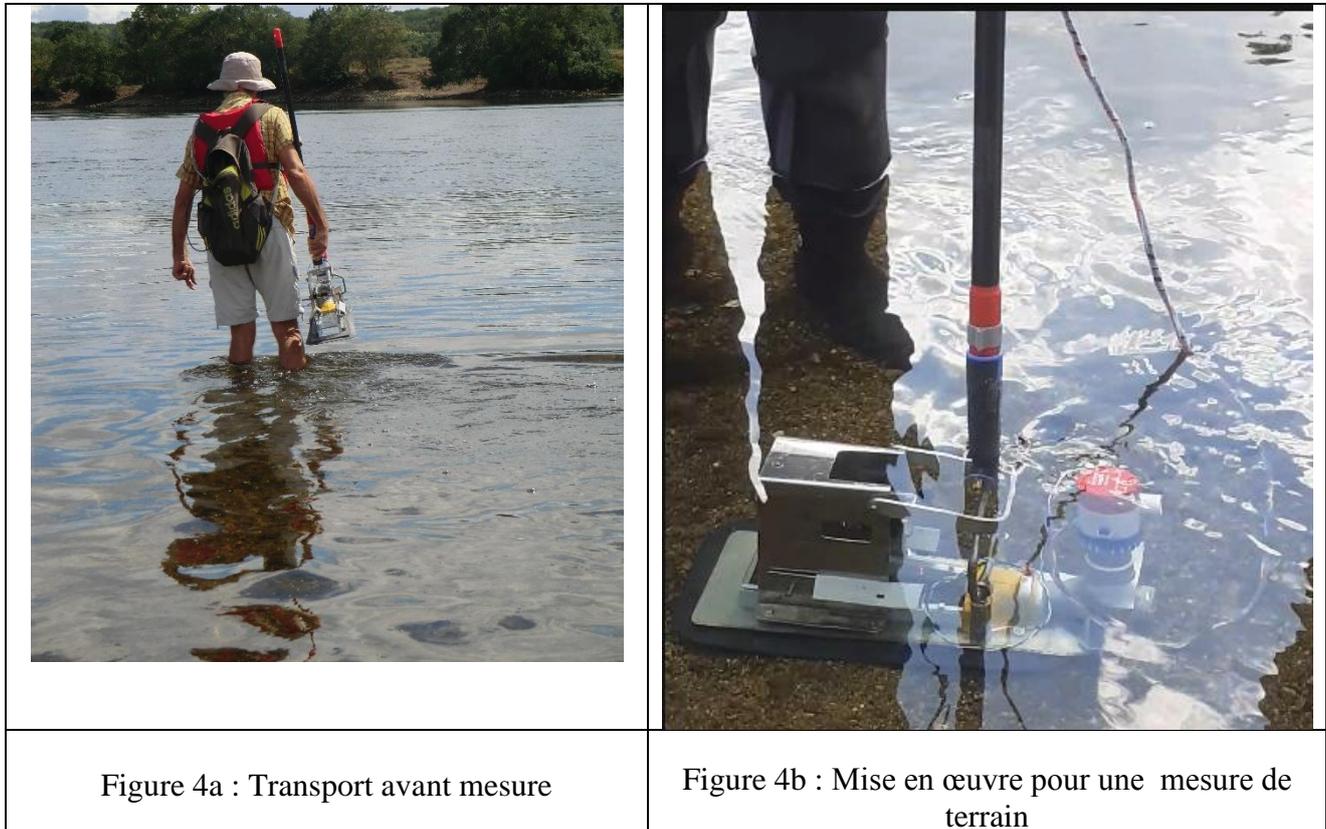


Figure 4 : courbe d'étalonnage

III – 2 Tests de terrain

Une campagne d'essais a été effectuée en août 2022 sur plusieurs sites du bassin de la Loire entre St Clément des Levées et le Bac d'Allier. L'objectif était de vérifier le fonctionnement du concept mais également de voir les limites de mises en œuvre. La figure 4a montre le PumpET porté par un expérimentateur. On note sa compacité et la facilité de transport. Le sac à dos contient la batterie permettant le fonctionnement de l'appareil. La figure 4b montre l'appareil lors d'une mesure, on note la jupe noire assurant le positionnement sur le lit sédimentaire et le manche vertical permettant le transport ainsi que la mise en place sur les sédiments.



Ces essais ont permis de confirmer que l'appareil peut être mis en œuvre pour des vitesses d'écoulement jusqu'à 1 m/s. Au-delà, il est difficile pour l'expérimentateur d'assurer simultanément sa sécurité et de plaquer la chambre de mesure au fond. De plus, la jupe souple noire a alors tendance à se tordre sous l'effet du courant. La réflexion est en cours pour améliorer cela. Un individu à pieds peut sans difficulté utiliser l'appareil jusqu'à avoir de l'eau à la taille. Pour des hauteurs d'eau supérieures, nous envisageons une mise en œuvre depuis un packraft.

Il convient enfin de noter que les essais sont destructifs au sens strict puisque le sédiment situé sous la chambre peut avoir été érodé. Cependant, comme l'emprise au sol est restreinte, il est possible de prélever du sédiment à l'extérieur immédiat de la chambre pour des analyses ultérieures au laboratoire (granulométrie mais également fraction organique).

IV – Détermination de l'érosion

Comme rappelé par [10], la détermination du seuil a donné lieu à de nombreux travaux d'où il ressort que là encore le seuil dépend beaucoup de la manière de le déterminer mais également des phénomènes érosifs subis par les sédiments. Une autre famille d'approche peut être représentée par [11] qui propose la détermination automatique de la mise en mouvement des grains en utilisant des images filmées au-dessus de la surface libre. Notre méthode est d'esprit semblable mais toujours avec choix délibéré de coût très maîtrisé, de légèreté et de matériel de terrain.

Pour le niveau de faisabilité, nous avons utilisé une méthode pas à pas. La scène filmée par la caméra a été divisée en 8 zones dans lesquelles nous avons quantifié le nombre de grains en mouvement (blanc si tous sont immobiles, jaune si un grain bouge, orange si quelques grains bougent, rouge si le mouvement est généralisé). La figure 5 montre un exemple lors des tests de calibration en eau calme avec un sable d'Hostun homogène de granulométrie comprise entre 2 et 4 mm. Les images vidéo montrent clairement que, pour les faibles vitesses, seuls quelques grains sont mis en mouvement et que progressivement de plus en plus de grains bougent.

La figure 6 montre un exemple de résultats de terrain pour des mesures dans le Loiret avec une vitesse d'écoulement estimée à 0,2 m/s et une granulométrie inférieure à 1 mm. Il est de la même manière possible de quantifier la mise en mouvement des grains. Il convient de noter qu'une végétation non négligeable est présente et que donc de nombreuses particules en suspension circulent entre la caméra et la chambre de mesure. C'est un point qui sera à traiter pour une automatisation des traitements.

V – Conclusions et perspectives

Un prototype d'érodimètre, appelé PumpET, a été conçu et fabriqué avec une volonté délibérée de créer un appareil léger, peu coûteux, facile à mettre en œuvre par une équipe réduite. En ceci, la première étape du projet a été réalisée. Les tests effectués sur le terrain ont également permis de valider le concept puisqu'il est possible d'observer la mise en mouvement des particules du lit situé en partie inférieure de la chambre de mesure.

Divers projets d'amélioration sont déjà en réflexion comme la mise en place d'un compte tour, tel qu'un loch de voilier, visible dans le champ de la caméra et permettant de déterminer la vitesse de l'écoulement à proximité de la chambre de mesure ou l'adaptation d'un système de transport de la batterie permettant de travailler avec des hauteurs d'eau plus importantes, la mise en œuvre depuis un engin permettant d'atteindre des hauteurs supérieures à 1 m d'eau.

Par ailleurs, des essais en laboratoire sont en préparation pour quantifier l'influence de la vitesse d'écoulement sur les résultats. Enfin, un travail de modélisation de l'écoulement à l'intérieur et autour de la chambre a été confié à des étudiants de Master 2 de l'Institut Francilien de Sciences Appliquées.

Références

- [1]M.P. Du Boys (1879), Le Rhône et les rivières à lit affouillable, Mem. Doc. Ann. Pont et Chaussées, Ser.5, 18.
- [2]A. Jerez, C. Chevalier, F. Larrarte, (2012), Erosion measurement on immersed situations: a state of the art; *ICSE6 Paris - August 27-31, 2012*
- [3]S. Dey and A. Papanicolaou (2008), Sediment threshold under steam flow : a state of the art review, *KSCE Journal of Civil Engineering* 12-1 : 45-60, doi : 10.1007/s12205-008-8045-3
- [4]S. Dey and S. K. Ali, (2019), Bed sediment entrainment by streamflow : state of the science, *Sedimentology*, 66, 1449-1485, doi : 10.1111/sed.12566
- [5]R.C. Grabowski, I. G. Droppo and G. Warton, (2011), Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties, *Earth-Science Reviews* 105-3 : 101-120, doi : 10.1016/j.earscirev.2011.01.008
- [6]P. Regazzoni, (2009), Confrontation et analyse d'érodimètres et caractérisation de la sensibilité à l'érosion d'interface, thèse de doctorat, Université de Nantes.

- [7]S.E. Perez, E. Kilpatrick, M. Faulks, (2010, A new method for measuring sediment shear and erosion, *Journal of Marine Environmental Engineering*, Vol. 9, 115-121
- [8]J. Grant, T.R. Walker, P.S. Hill, D.G. Lintern (2013), BEAST – A portable device for quantification of erosion in natural intact sediment cores, *Methods in oceanography*,5, 39-55, doi : 10.1016/j.mio.2013.03.001
- [9]C. He, J. N. Taylor, Q. Rochfort, D. Nguyen (2021), *International Journal of Sediment Research*, 36, 235-242, doi : 10.1016/j.ijsrc.2020.08.004
- [10]D. Paphitis, M.B. Collins, (2005), Sand grain threshold, in relation to bed “stress history” : an experimental study, *Sedimentology*, 52, 827-838, doi : 10.1111/j.1365-3091.2005.00710.x
- [11]A.N.H. Chegini, S. Tait, (2011), Automated measurement of moving grains on bed deposits, *International Journal of Sediment Research* Vol. 26, N°3, 304-317

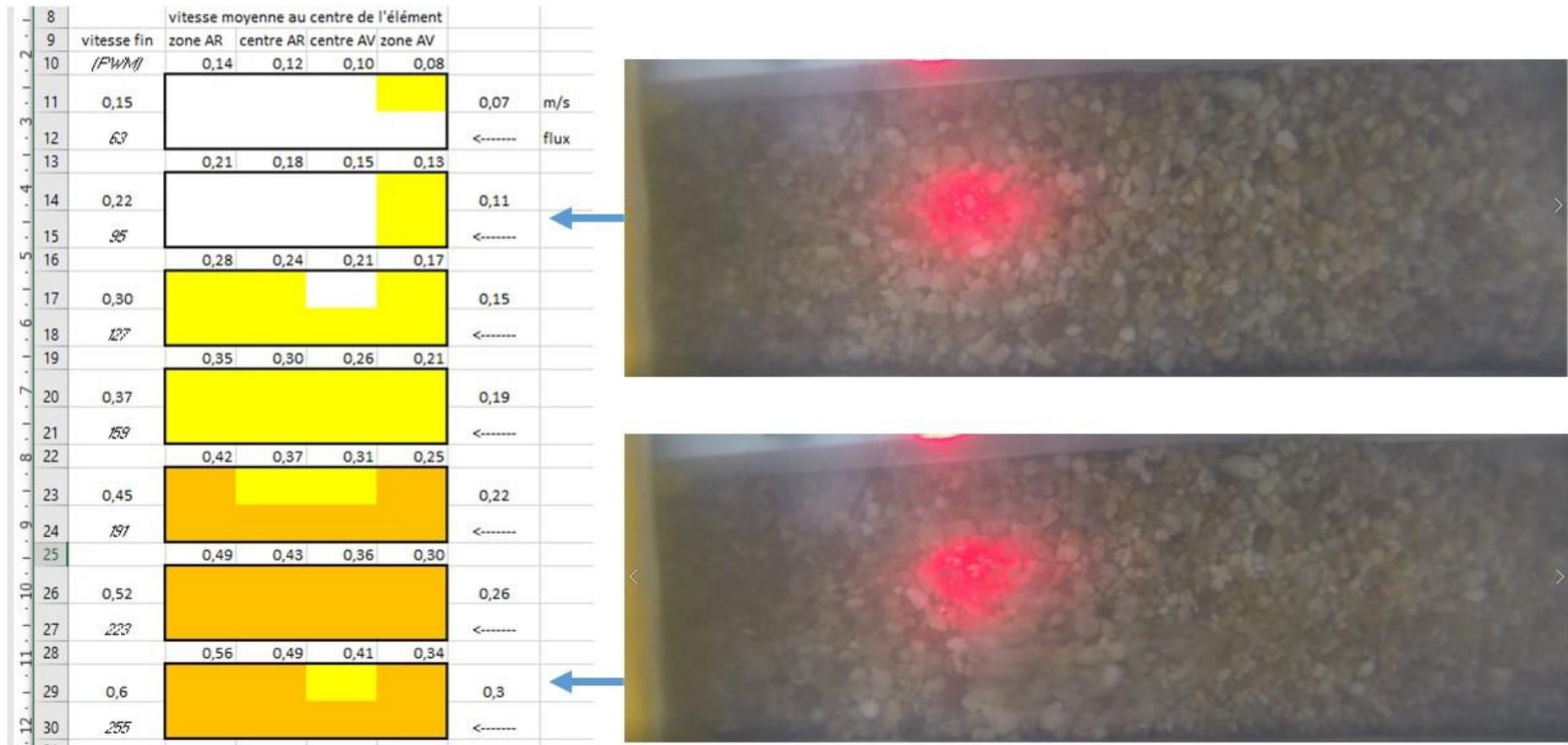


Figure 5 : détermination de la mise en mouvement des grains pour un sable moyen de granulométrie étroite, essai en eau calme.

| 8 | | vitesse moyenne au centre de l'élément | | | | |
|----|-------------|--|-----------|-----------|---------|--------|
| 9 | vitesse fin | zone AR | centre AR | centre AV | zone AV | |
| 10 | (PVM) | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | |
| 11 | 0,15 | | | | | 0,07 |
| 12 | 63 | | | | | <----- |
| 13 | | 0,21 | 0,18 | 0,15 | 0,13 | |
| 14 | 0,22 | | | | | 0,11 |
| 15 | 95 | | | | | <----- |
| 16 | | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,17 | |
| 17 | 0,30 | | | | | 0,15 |
| 18 | 127 | | | | | <----- |
| 19 | | 0,35 | 0,30 | 0,26 | 0,21 | |
| 20 | 0,37 | | | | | 0,19 |
| 21 | 159 | | | | | <----- |
| 22 | | 0,42 | 0,37 | 0,31 | 0,25 | |
| 23 | 0,45 | | | | | 0,22 |
| 24 | 191 | | | | | <----- |
| 25 | | 0,49 | 0,43 | 0,36 | 0,30 | |
| 26 | 0,52 | | | | | 0,26 |
| 27 | 223 | | | | | <----- |
| 28 | | 0,56 | 0,49 | 0,41 | 0,34 | |
| 29 | 0,6 | | | | | 0,3 |
| 30 | 255 | | | | | <----- |
| 31 | | | | | | |

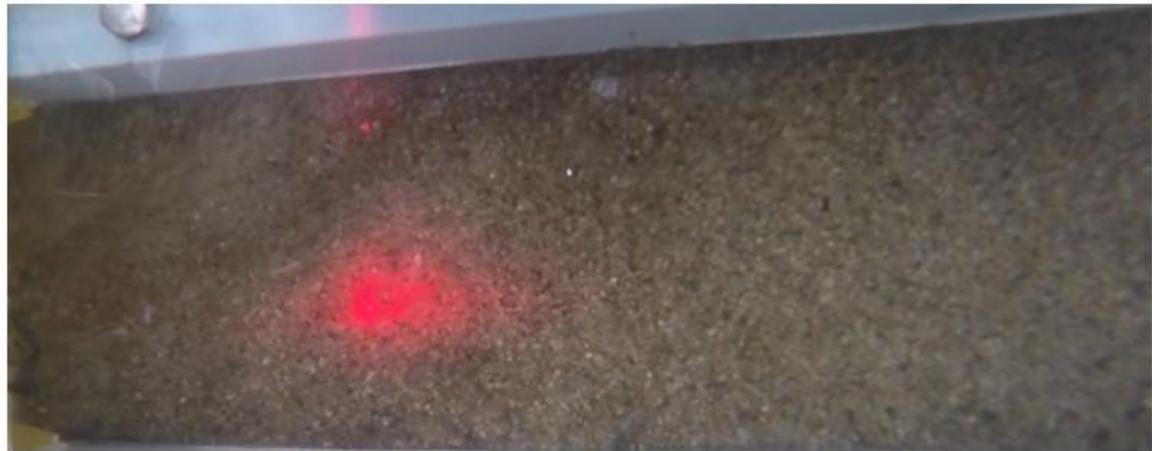
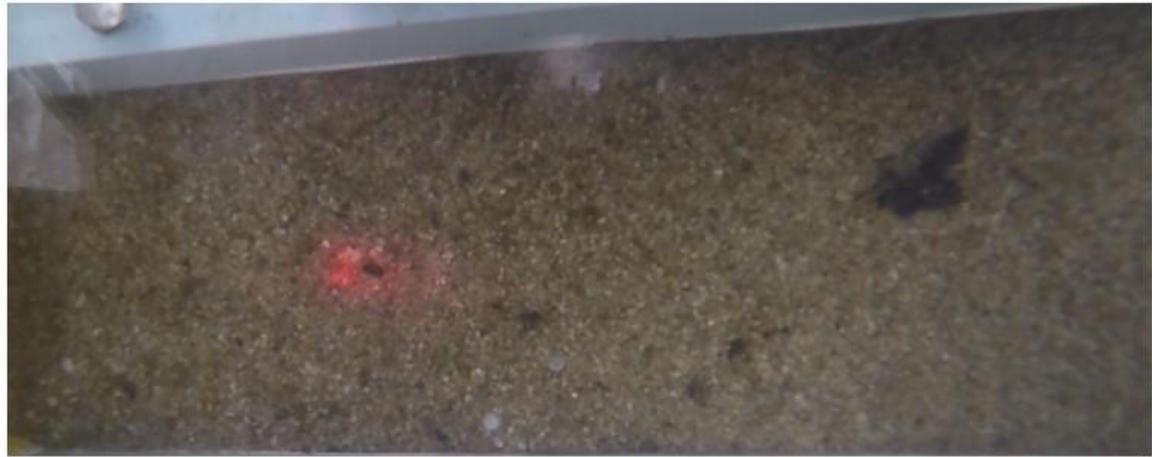


Figure 6 : détermination de la mise en mouvement des grains pour une rivière avec présence d'algues