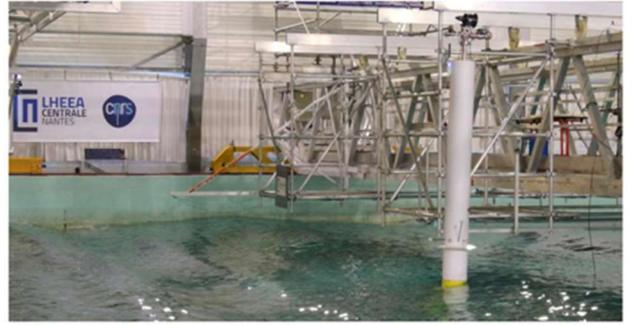
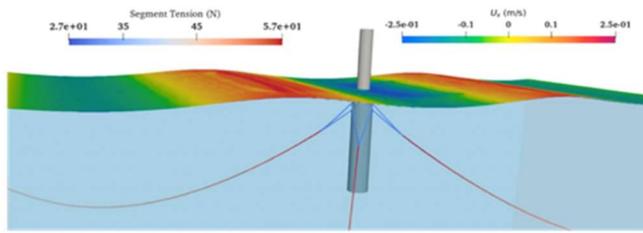


# 19<sup>e</sup> Journées de l'Hydrodynamique

26 – 28 novembre 2024, Nantes



OU ON REPARLE DU PUMP EROSION TEST POUR PRECISER SES SPECIFICITES

WHERE WE RETURN TO THE PUMP EROSION TEST TO CLARIFY ITS SPECIFIC FEATURES

**S. CADET<sup>(1)</sup>, F. LARRARTE<sup>(2,3)</sup>, J. T. MBOLAMANA<sup>(4)</sup>, G. GOMIT<sup>(1)</sup>, S. JARNY<sup>(1)</sup>, X. NICOLAS<sup>(4)</sup>, C. CHEVALIER<sup>(2)</sup>**

*[simon.cadet@univ-poitiers.fr](mailto:simon.cadet@univ-poitiers.fr); [frederique.larrarte@univ-eiffel.fr](mailto:frederique.larrarte@univ-eiffel.fr); [guillaume.gomit@univ-poitiers.fr](mailto:guillaume.gomit@univ-poitiers.fr); [sebastien.jarny@univ-poitiers.fr](mailto:sebastien.jarny@univ-poitiers.fr); [xavier.nicolas@univ-eiffel.fr](mailto:xavier.nicolas@univ-eiffel.fr); [christophe.chevalier@univ-eiffel.fr](mailto:christophe.chevalier@univ-eiffel.fr)*

<sup>(1)</sup> Institut P<sup>2</sup> CNRS, ISAE-ENSMA – UPR 3346, Université de Poitiers, 86073 Poitiers Cedex 9, France

<sup>(2)</sup> Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

<sup>(3)</sup> Laboratoire d'Hydraulique Saint Venant – 6 quai Watier 78401 Chatou, France

<sup>(4)</sup> Univ Gustave Eiffel, MSME UMR 8208 CNRS, F-77454 Marne-la-Vallée, France

## Résumé

Un prototype de terrain dédié à la mesure de l'érodabilité de sédiments fins a été développé. Cet appareil, nommé PumpET, pour *Pump Erosion Test*, a été conçu de manière empirique pour être un matériel de terrain « low cost », aisément transportable et reproductible. Il a été présenté lors des 18<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique. Des tests sur le terrain ont permis de valider le concept. Dans le même temps, diverses pistes d'amélioration ont été envisagées. Mais avant toute modification du prototype, nous avons choisi de préciser ses potentialités par, d'une part, des essais en conditions contrôlées et, d'autre part, des simulations numériques impliquant des étudiants de Master 2. Nous présenterons les démarches suivies, les résultats et surtout les implications vers des modifications plus ou moins substantielles de ce prototype.

## Summary

A field prototype dedicated to measuring the erodibility of fine sediments has been developed. This device, named PumpET, for *Pump Erosion Test*, was designed empirically to be a low-cost, easily transportable and reproducible piece of field equipment. It was presented at the 18<sup>th</sup> Journées de l'Hydrodynamique. Field tests validated the concept. At the same time, various avenues of improvement were explored. But before making any modifications to the prototype, we decided to clarify its potential by carrying out tests under controlled conditions, on the one hand, and numerical simulations involving Master 2 students, on the other. We will present the steps taken, the results and, above all, the implications for more or less substantial modifications to the prototype.

## **I – Introduction**

L'érosion, c'est-à-dire la mise en mouvement et le déplacement de sédiments sous l'effet d'un écoulement, est un phénomène qui peut avoir une forte influence sur la stabilité des structures de génie civil. Si ce phénomène est étudié de longue date, l'état de l'art fait par [1] il y a cinq ans indiquait combien la détermination d'un seuil d'érosion reste une tâche difficile. La situation est encore plus complexe lorsqu'il s'agit de quantifier l'érodabilité sur le terrain.

Un prototype de matériel de terrain dédié à la mesure de l'érodabilité de sédiments fins, tels que 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, a été développé. Cet appareil, nommé PumpET, pour *Pump Erosion Test*, a été conçu de manière empirique pour être un matériel de terrain « low cost », aisément transportable et reproductible. Il a été présenté lors des 18èmes Journées de l'Hydrodynamique [2] ainsi que les résultats des tests préliminaires sur le terrain.

Si des tests effectués sur le terrain ont 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, diverses questions et pistes d'amélioration ont été pointées. A la suite de cela, le travail a été décomposé en deux parties en s'appuyant sur le travail de stagiaires de Master 2 :

- Un partenariat entre les laboratoires SRO et MSME de l'Université Gustave Eiffel pour une étude numérique de l'écoulement dans et autour de la chambre de mesure,
- Un partenariat entre le laboratoire SRO et l'Institut P' pour une étude expérimentale en laboratoire.

Nous présenterons les démarches suivies, les résultats et surtout les implications vers des modifications du prototype.

## **II – Rappel sur le prototype**

L'objectif ici est de proposer un matériel de terrain « low cost » permettant de générer et de 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 (Figure 1) 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 :

- une pompe centrifuge immergée 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 microcontrôleur pour appliquer des paliers de débit au sein de la chambre de mesure.
- la chambre de mesure est de section variable. 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 pour un même débit, le déclenchement de l'érosion 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  $45^\circ$  sont projetés à travers la paroi supérieure transparente de la chambre de mesure. Leur déformation devrait permettre de mesurer le creusement du lit sédimentaire dans la chambre de mesure. Cependant lors d'essai, il s'est avéré qu'ils ne permettaient pas de correctement mesurer le creusement et qu'ils rendaient la visibilité des sédiments plus compliquée. Ils ont pour l'instant été désactivés.

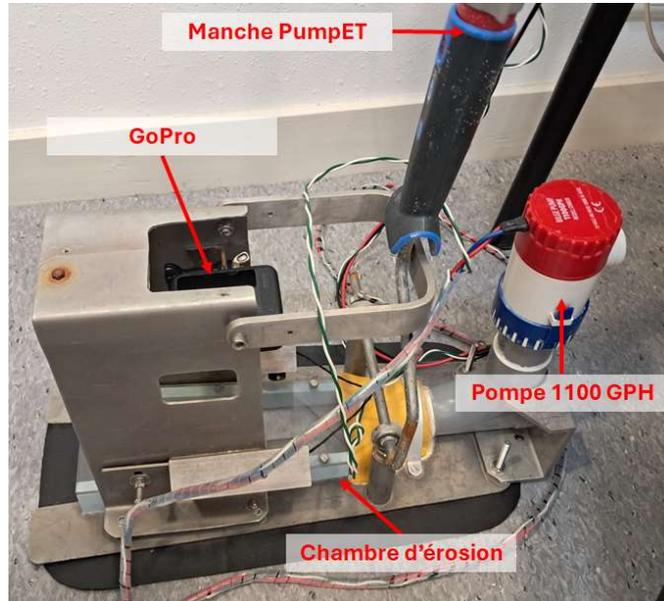


Figure 1 : le PumpET et ses principaux composants

### **III – Etude des caractéristiques de l'appareil**

#### **III – 1 Etude numérique**

L'étude numérique vise à modéliser l'écoulement à l'intérieur de la chambre de mesure en fonction des conditions d'utilisation (débit, co-courant/contre-courant) et d'avoir accès à une estimation des contraintes sur le fond. Dans cette étude, on utilise le code de calcul ANSYS/Fluent qui résout les équations URANS (équations de Navier-Stokes moyennées instationnaires) et propose plusieurs modèles de turbulence. Le modèle RSM (Reynolds Stress Model), basé sur les équations de transport des composantes du tenseur de Reynolds et du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [3], a été choisi. Il permet de tenir compte de l'anisotropie prévisible de la turbulence à proximité de l'appareil et dans la chambre. Comme ce modèle est connu pour sa difficulté à faire converger les équations de transport des tensions de Reynolds, on opte pour une version dans laquelle le transport de la turbulence et le retour à l'isotropie sont traités avec le modèle « Linear Pressure Strain » qui est réputé plus stable. De plus, pour le traitement des couches limites près des parois (lit et bords inclinés de la rivière), on choisit une loi de paroi évolutive (« Scalable Wall Function ») car elle permet une meilleure convergence que la loi de paroi standard et permet de tenir compte de l'épaisseur des rugosités du lit.

La Figure 2 présente le domaine de calcul 3D du PumpET immergé dans la rivière. Une étude de sensibilité au maillage des profils de vitesse et du champ de contrainte sur le lit a été menée afin d'assurer un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats dans la rivière et la chambre de mesure du PumpET. Le maillage sélectionné est multi blocs, polyédrique autour du PumpET et avec des couches limites sur toutes les surfaces solides. Il contient 1,7 million de mailles.

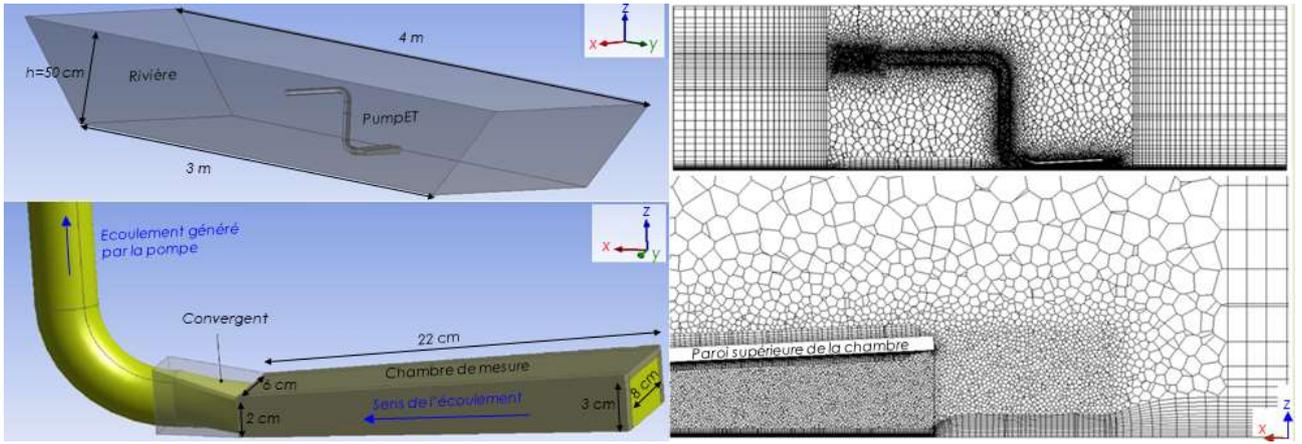


Figure 2 : Domaine de calcul (à gauche) et maillage sur le plan vertical médian (à droite) du PumpET immergé dans la rivière (en haut) et zoom sur la chambre de mesure (en bas).

L'effet de la rugosité du lit de la rivière et de ses bords inclinés est pris en compte dans une loi de paroi modifiée du type [3] :

$$\frac{\bar{u}_p u^*}{\tau_p / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta U^+ \quad (1)$$

où  $\bar{u}_p$ ,  $y_p$  et  $\tau_p$  sont respectivement la vitesse moyenne du fluide et la distance à la paroi au centre de la 1<sup>ère</sup> cellule au contact de la paroi et la contrainte pariétale.  $\kappa=0,41$  et  $E=9,793$  sont la constante de Karman et une constante empirique.  $u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$  avec  $k$  l'énergie cinétique turbulente et  $C_\mu=0,09$ . La fonction de rugosité  $\Delta U^+$  dépend du nombre de Reynolds de rugosité  $Re^*$  [4]. Elle est calculée en se basant sur les travaux de Cebeci et Bradshaw [5]. Pour les régimes turbulents totalement rugueux qui nous concernent (pour  $Re^* > 90$ ),  $\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(C_s Re^*)$  avec  $C_s$  compris entre 0,5 (cas des grains de sable monodispersés) et 1 (cas très polydispersé). Une condition de contrainte nulle est imposée sur la surface libre supérieure de la rivière en  $z=h=50$  cm. Un profil de vitesse turbulent établi est imposé comme condition d'entrée dans la rivière. Ce profil de vitesse a été obtenu au préalable sans la présence du PumpET en imposant des conditions aux limites périodiques dans la direction  $x$  longitudinale. Nous avons vérifié qu'il s'accorde à moins de 2% près avec le profil de Coles [6] sur toute la hauteur du PumpET. Par ailleurs, le débit dans le PumpET est contrôlé en imposant au centre de son tube vertical la caractéristique de sa pompe, i.e. le gain de charge de la pompe en fonction du débit qui a été mesuré expérimentalement.

Les simulations avec le modèle RSM et une loi de paroi modélisant la présence des rugosités (Eq. (1)) ont été validés par des comparaisons avec les simulations LES de Cui et al. [7] et les expériences de Okazaki et al. [8] dans des configurations proches de celle de la chambre du PumpET. Cui et al. [7] ont effectué des simulations LES d'un écoulement à  $Re=10^4$  dans une conduite rectangulaire dont la paroi supérieure est lisse et la paroi inférieure est rendue rugueuse grâce à la présence de nervures de taille  $k_s=0,1 H$ , avec  $H$  la hauteur du canal. Okazaki et al. [8] ont effectué des expériences dans la même configuration mais pour un écoulement à  $Re=1,5 \cdot 10^4$ . Les profils verticaux de la vitesse moyenne longitudinale  $V_x$ , rapportés à la vitesse moyenne  $V_m$ , obtenus avec Ansys/Fluent pour différentes positions du domaine de calcul par rapport à la hauteur des rugosités sont présentés sur la Fig. 3 et comparés aux expériences et LES. On constate que l'accord des profils est correct à condition de décaler la paroi inférieure à la moitié de la hauteur ( $k_s/2$ ) ou à la hauteur ( $k_s$ ) des nervures.

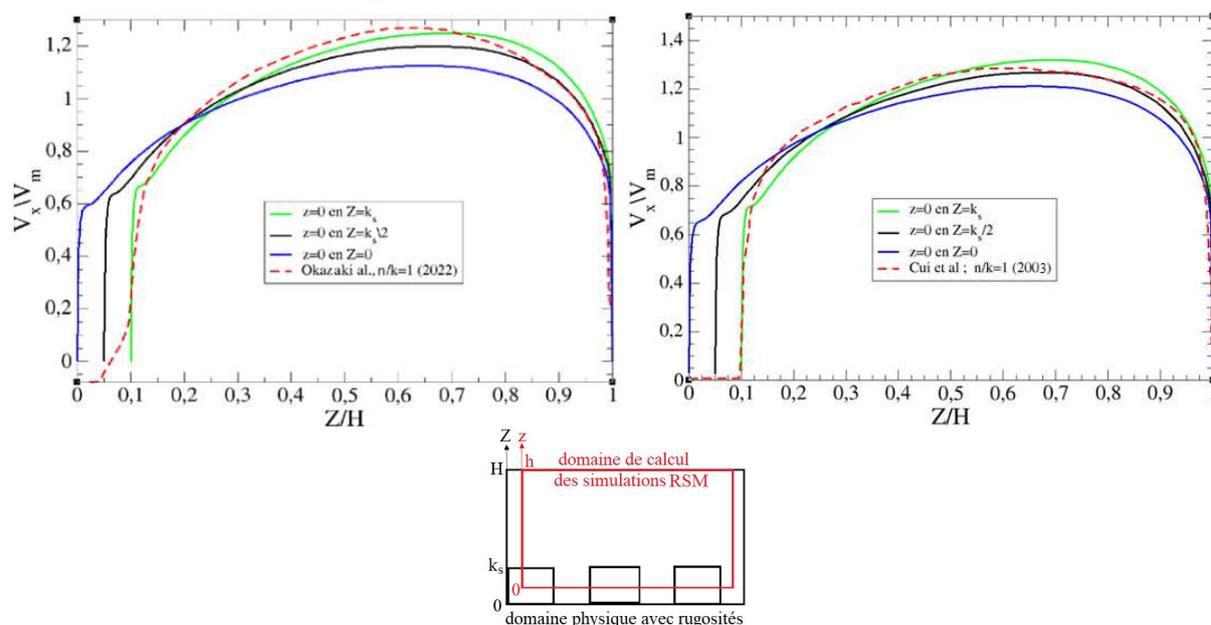


Figure 3 : Profils verticaux de la vitesse moyenne  $V_x$  obtenus avec Fluent (modèle RSM + loi de paroi rugueuse) pour différentes positions du domaine de calcul par rapport à la hauteur des rugosités. Comparaisons avec les expériences de [8] à gauche et les LES de [7] à droite.

### III – 2 Etude expérimentale

Les essais en laboratoire ont été réalisés dans le canal hydro sédimentaire de la plateforme pHE de l'Institut P'. Ce canal à surface libre a une longueur de 7 m, 40 cm de large et une profondeur maximale de l'ordre de 50 cm. Il est muni d'une cavité ( $3 \times 40 \times 60 \text{ cm}^3$ ) dans laquelle les sédiments sont placés. Le PumpET est posé sur les sédiments (Figure 4). Le PumpET n'est pas alimenté avec la batterie mais avec une alimentation continue sur secteur réglée à 13,21 V, le niveau de tension maximale de la batterie après charge. Nous avons réalisé au moins 10 mesures à une unique hauteur d'eau de 30 cm, nécessaire pour que la sortie de la pompe soit immergée.

L'appareil est contrôlé à l'aide d'une carte Arduino installée dans un boîtier de protection et alimentée par une batterie de 5 V, permettant d'alimenter les systèmes du PumpET à l'aide d'une batterie de 12 V possédant un plus grand stockage énergétique. Le tout est placé dans un sac à dos que l'utilisateur porte et est relié au PumpET par un câble. Pour utiliser le PumpET, il suffit de lancer la GoPro et un enregistrement vidéo, vérifier le point de vue de la GoPro, puis placer le PumpET sur le fond du cours d'eau à l'aide du manche et lancer le cycle incrémental des débits de la pompe en branchant la batterie 5 V. Une fois le cycle du PumpET terminé, il suffit de relever le PumpET, d'éteindre la GoPro et de répéter l'expérience autant de fois que nécessaire. Des tests préliminaires ont montré que la batterie se décharge après chaque essai, modifiant le comportement de la pompe, qui aspire alors de moins en moins. Ce point sera donc à traiter pour fiabiliser l'appareil sur le terrain.

Tableau 1 : Paramètres de la GoPro

Résolution :	4K	Vitesse IPS (ou FPS) :	50
Champ visuel (FOV) :	Large	Stabilisation :	Non
Zoom :	Aucun	Débit :	Elevé
Obturateur :	Auto	Comp V.E. :	0.0
Bal. Blancs :	Auto	Retardateur :	10 secondes
Netteté :	Elevé	Couleur :	naturelle
Audio RAW :	OFF	Vent :	Auto

La GoPro possède divers paramètres résumés dans le tableau 1 et l'impact de tous ces paramètres n'a pas été étudié. Ce sont pour la plupart des paramètres par défaut de la caméra mais, lors du traitement d'image, uniquement une image sur quatre a été gardée ce qui revient à un IPS final de 12,5.

Trois types de sédiments avec des compositions granulométriques différentes ont été étudiés. Premièrement (i) des sédiments calibrés (~2 mm) bicolores ont été utilisés comme référence pour développer le traitement d'images. Ensuite deux types de sédiments naturels (sable prélevé sur le Clain) ont ensuite été utilisés : (ii) des sédiments 'bruts' avec une granulométrie étendue et comportant de la matière organique (iii) le même sédiment tamisé (0,16 mm à 1,60 mm). Ces derniers types de sédiments présentent moins de contraste pour le traitement vidéo et une granulométrie plus étendue mais correspondent à la gamme visée par le PumpET.

Le traitement des vidéos réalisées avec le PumpET était initialement manuel et nécessitait de déterminer à l'œil nu le seuil de mise en mouvement des sédiments de façon similaire à la méthode proposée par [10] avec 3 seuils. [10] propose de surcroit l'utilisation d'un traitement d'images. Cela permet de fiabiliser la détection du seuil qui ne dépend alors plus d'un opérateur et permet également un gain de temps important sur le traitement des vidéos. Dans notre approche, nous reprenons l'idée des 2 paliers :

- Palier A : premiers déplacements de sédiments ;
- Palier B : mise en mouvement de la majorité des sédiments.

Ces paliers servent notamment de comparatif entre la méthode par traitement d'images et la méthode à l'œil nu qui était initialement utilisée.

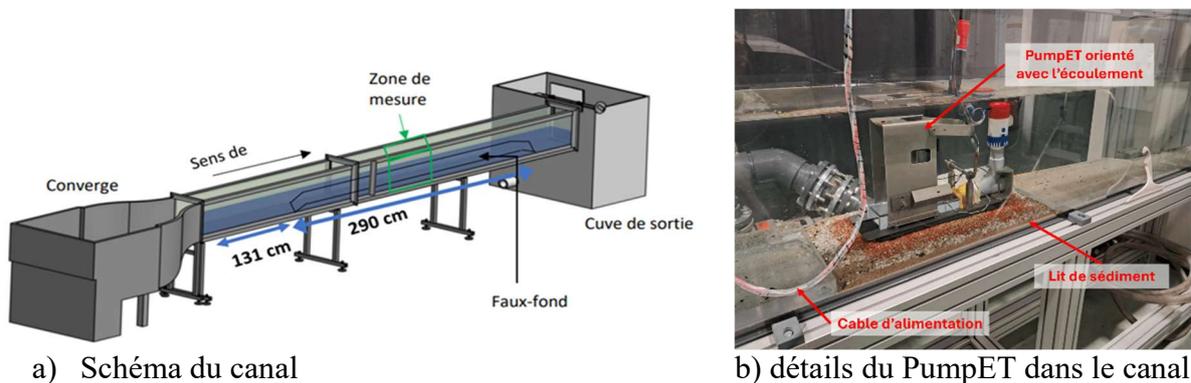


Figure 4 : Montage expérimental

Pour la détermination des paliers, [10] proposait 2 méthodes, celles du :

- taux de corrélation basé sur l'utilisation de la fonction CORR2 du logiciel Matlab
- taux de soustraction basé sur la différence entre les images.

Comme [10] indique que la méthode par corrélation est très sensible à l'homogénéité du sable, notamment pour la détection du palier A, nous avons utilisé la méthode par soustraction. Dans la méthode du taux de soustraction, la matrice différentielle du taux de soustraction  $D_m$  est calculée à partir des matrices de pixel  $I_m$  de la vidéo en niveau de gris.  $D_m$  est la différence entre deux images consécutives, donc entre deux instants  $t$ . Elle correspond à la variation des niveaux de gris entre deux instants consécutifs (équation 2). Chaque  $D_m$  correspond à la différence entre deux images consécutives. Donc si des particules ont bougé entre 2 images, des valeurs élevées vont apparaître dans  $D_m$ .

$$D_m = |I_{m+1} - I_m| \quad (2)$$

avec  $m$  le numéro de l'image de la vidéo.

Le bruit est défini sur chaque pixel comme la moyenne en temps, sur l'ensemble des images prises avant le démarrage de la pompe, des valeurs du taux de soustraction. Il est calculé selon l'équation (3) :

$$\text{bruit}(p, q) = \overline{d_{m,p,q}} \text{ pour } m \in [1; \text{départ cycle}] \quad (3)$$

avec  $d_{p,q,m}$  la valeur de  $D_m$  à la position  $p, q$  de la matrice à l'instant  $m$ .

On considère ensuite à chaque instant que :

$$\text{Si } d_{m,p,q} < \text{bruit}(p, q) \text{ alors } d_{m,p,q} = 0 \quad (4)$$

Le nombre de termes  $d_{m,p,q}$  non-nuls de chaque matrice différentielle  $D_m$  est compté pour définir le taux de soustraction additionné :

$$\Delta_{\text{somme}}(m) = \sum_{p,q} \mathbb{1}_{\mathbb{R}_+^*}(d_{m,p,q}) \quad (5)$$

Si l'on revient aux travaux de [10], le seuil A correspond aux premiers mouvements repérés par le maximum de la différences  $D_m$  entre 2 images. Le seuil B correspond à une augmentation du nombre de termes non nuls dans  $D_m$  donc du taux de soustraction additionné et traduit une augmentation forte du nombre de particules en mouvement. Par contre cette évolution n'est pas monotone (courbe rouge sur la Figure 5 passant par des minima et des maxima locaux) ce qui est interprété par des mouvements par bouffées.

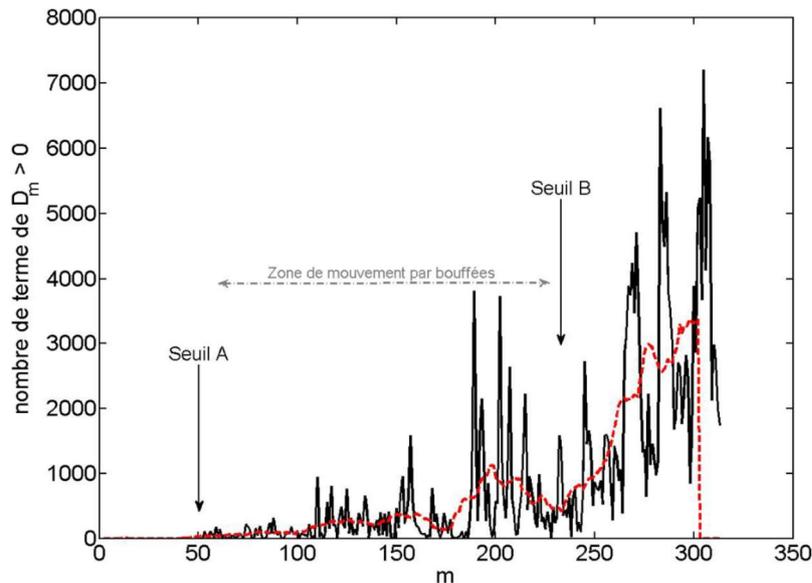


Figure 5 – Nombre de termes non nuls des matrices  $D_m$  en fonction de  $m$ . La ligne pointillée rouge correspond à la moyenne mobile sur 10m [10]

Etant donnée la forme convergente de la chambre, la vitesse n'est pas constante sur la longueur et le traitement originel à l'œil nu se faisait en découpant la chambre en zones. Cette idée a été reprise ici pour le traitement d'image. Le système de numérotation  $(i, j)$  est utilisé pour les zones découpées avec  $i$  pour la longueur et  $j$  pour la largeur de la chambre d'érosion (Figure 6). Les points d'entrée et de sortie de la chambre d'érosion sont notés ainsi que les points de coordonnées 1 et 2 définissant le recadrage de la vidéo. L'entrée de la chambre d'érosion doit se trouver à droite et la sortie à gauche.

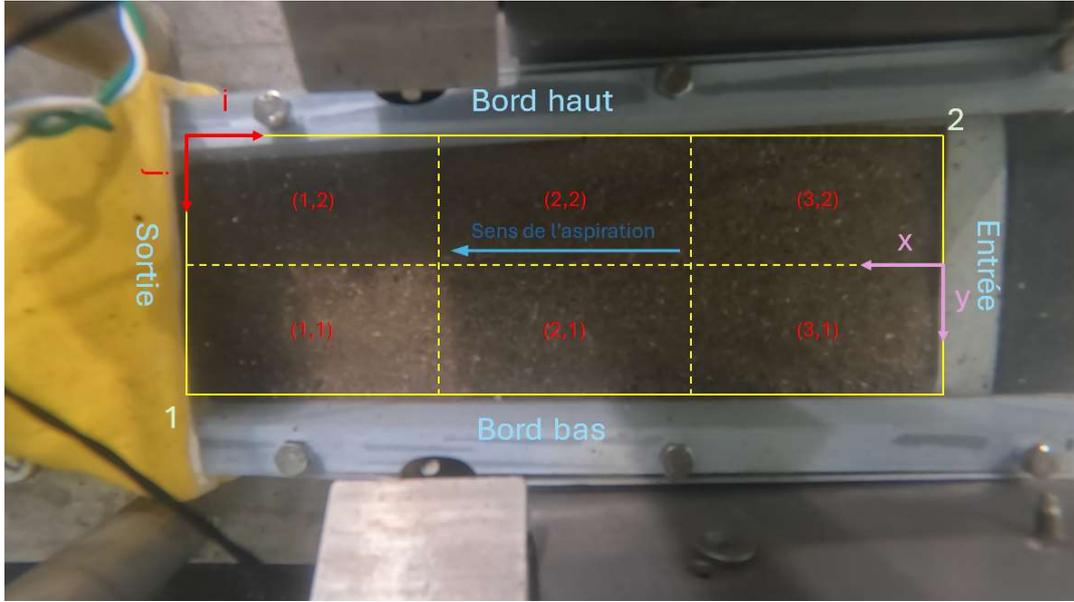


Figure 6 – Découpage de l’image et numérotation des zones avec les axes  $i, j$  utilisés pour la numérotation du découpage et les axes  $x, y$  utilisés comme référentiel de la partie simulation

En appliquant ce système de numérotation au traitement d’image présenté précédemment, nous définissons :

$$D_{m,i,j} = |I_{m+1,i,j} - I_{m,i,j}| \quad (6)$$

avec  $m$  le numéro de l’image de la vidéo.

$$\Delta_{\max}(m,i,j) = \max(D_{m,i,j}) \quad (7)$$

Enfin, le taux de soustraction additionné relatif est défini comme le taux de soustraction additionné divisé par sa valeur maximale potentielle, c’est-à-dire le nombre de pixel de la zone (en ignorant les parties masquées) soit sa surface( $i, j$ ).

$$\Delta_{\text{somme relatif}}(m, i, j) = \Delta_{\text{somme}}(m, i, j) / \text{surface}(i, j) \quad (8)$$

## **IV – Résultats**

### **IV – 1 Etude numérique**

En accord avec les expériences Tachie et al. [9], les simulations avec le modèle RSM montrent une diminution d’autant plus forte de la vitesse au voisinage de la paroi inférieure ( $z=0$ ) que la rugosité augmente (cf. Figure 7, gauche). Cette perte de quantité de mouvement dans le bas de la chambre génère une accélération vers le haut ( $z>1$  cm), du côté de la paroi lisse supérieure de la chambre du PumpET (située à  $z \approx 0,0215$  m), pour conserver le débit. Cette diminution de vitesse due aux rugosités est due à la forte augmentation des fluctuations turbulentes et donc de la viscosité turbulente  $\mu_t$  près du lit de la rivière (cf. Figure 7, milieu). En conséquence, la contrainte pariétale totale de cisaillement, définie par l’équation (9)

$$\tau_p = (\mu + \mu_t) d\bar{u}/dz \quad (9),$$

augmente avec la taille des rugosités et augmente vers l’aval de la chambre de mesure due à sa restriction de section et à l’accélération de l’écoulement (cf. Figure 7, droite).

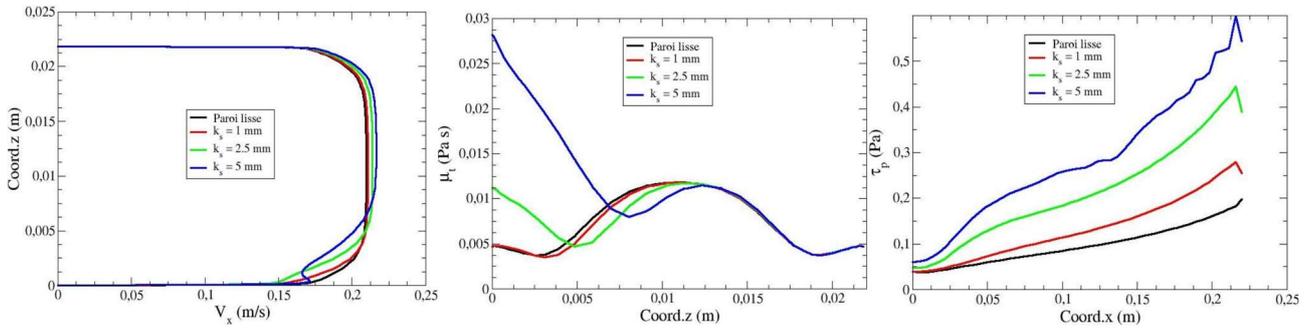


Figure 7 : Profils verticaux de la vitesse  $V_x$  (haut gauche) et de la viscosité turbulente  $\mu_t$  (haut droite) en  $x=18$  cm et  $y=0$  et profils longitudinaux de la contrainte pariétale  $\tau_p$  en  $(y, z)=(0, 0)$  (bas) obtenues, dans la chambre du PumpET, avec le modèle RSM pour différentes épaisseurs  $k_s$  des rugosités, pour une vitesse moyenne  $V_{m,e/p} = 0,11$  m/s à l'entrée de la chambre (débit  $Q=0,276$  kg/s dans le PumpET).

Les simulations de l'écoulement dans le PumpET en tenant compte de l'influence de la rivière sont menées pour une taille de rugosité du lit fixée à  $k_s=2,5$  mm. On fait varier de manière indépendante les vitesses moyennes de la rivière,  $V_{m/r}$ , et de l'écoulement à l'entrée du PumpET,  $V_{m,e/p}$ , tel que cela est présenté dans le Tableau 2. On constate au travers des champs de vitesse présentés dans la Figure 8 que le rapport  $V_{m/r}/V_{m,e/p}$  des vitesses moyennes dans la rivière et le PumpET est un paramètre important à prendre en compte car l'écoulement près de l'entrée de la chambre de mesure en est fortement influencé : à cause de l'épaisseur non nulle de la paroi supérieure de la chambre, une recirculation d'autant plus intense se forme au-dessus de la chambre lorsque  $V_{m/r}/V_{m,e/p} > 1$  (cas 1, 2 et 3) et en dessous de cette paroi lorsque  $V_{m/r}/V_{m,e/p} < 1$  (cas 5 et 6).

Tableau 2 : Différents cas simulés, classés en fonction du rapport des vitesses moyennes  $V_{m/r}/V_{m,e/p}$

	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5	cas 6
$V_{m/r}$ [m/s]	0,70	0,70	0,50	0,50	0,50	0,30
$V_{m,e/p}$ [m/s]	0,11	0,30	0,30	0,50	0,70	0,70
$V_{m/r}/V_{m,e/p}$	6,36	2,30	1,68	1,00	0,71	0,43

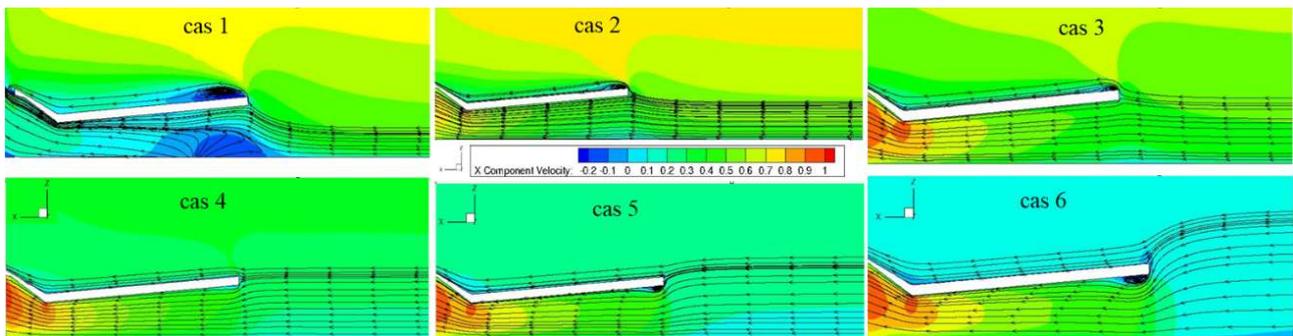


Figure 8 : Champs de  $V_x$  et lignes de courant à l'entrée de la chambre de mesure pour les cas du Tableau 1.

Comme cela est illustré sur la Figure 9, ces recirculations peuvent modifier la contrainte  $\tau_p$  sur le lit à l'entrée de la chambre. Par exemple, dans le cas 6 où la vitesse à l'entrée du PumpET est 2,3 fois plus grande que celle de la rivière,  $\tau_p$  a un comportement non monotone selon  $x$  (Figure 9a). La contrainte  $\tau_p$  croît fortement sous la recirculation présente à l'entrée de la chambre pour  $x < 2$  cm, puis décroît jusqu'à  $x=7$  cm et croît de nouveau. De plus, le profil transverse selon  $y$  de  $\tau_p$  est non uniforme à l'entrée (Figure 9b). Des comportements non monotones selon  $x$  et non uniformes selon  $y$  sont également observés dans le cas 1 où la vitesse à l'entrée du PumpET est bien plus petite que celle de la rivière. En revanche, pour les cas 2 à 5, les profils longitudinaux de  $\tau_p$  sont bien

monotones croissants selon  $x$  et relativement uniformes selon  $y$ , surtout dans la partie aval de la chambre (Figures 9c et 9d).

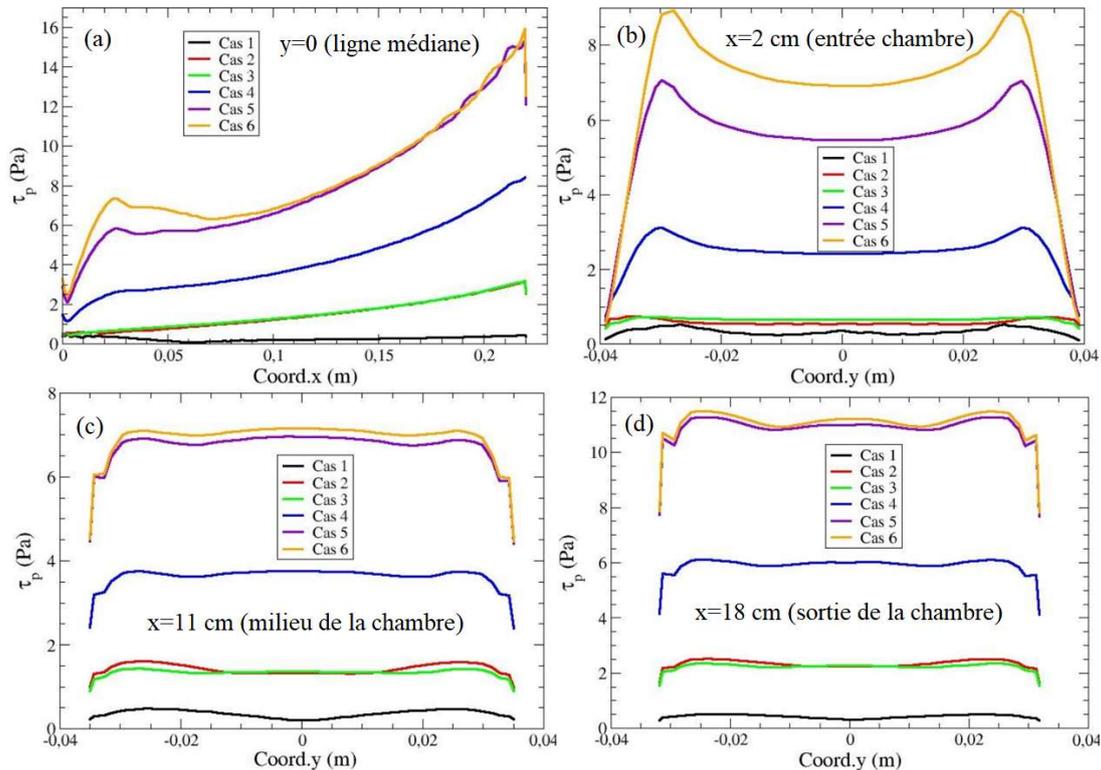


Figure 9 : Profils longitudinaux (a) et transversaux (b, c, d) de la contrainte de cisaillement sur le lit ( $z=0$ ) au sein de la chambre de mesure pour les 6 cas du Tableau 1.

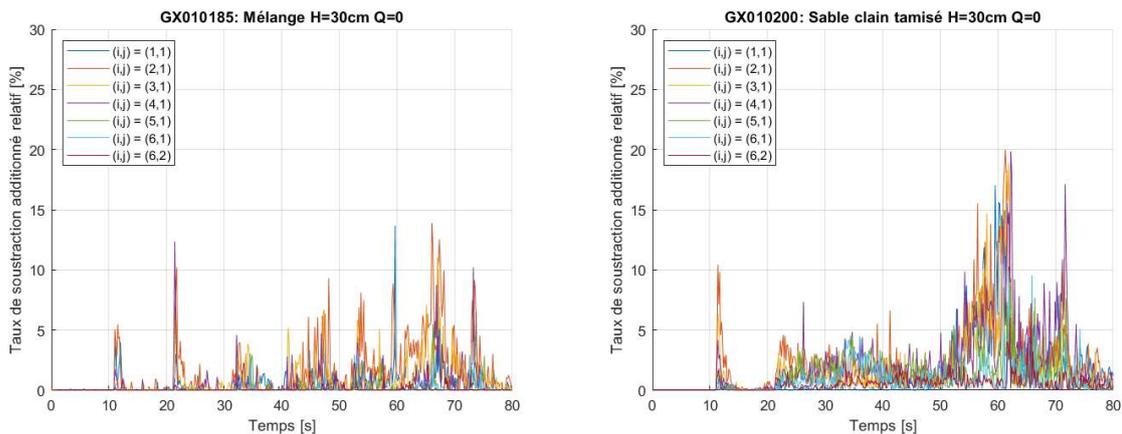
#### IV – 2 Etude expérimentale

Nous présentons ci-après un exemple de résultats. Le traitement des essais a été réalisé en plaçant le point de départ de l'analyse de la vidéo au début du palier d'arrêt, c'est-à-dire 10 secondes avant le début du cycle du PumpET et donc du premier palier d'allumage de la pompe. Le point d'arrêt de l'analyse est placé 5 à 10 secondes après l'arrêt du PumpET, après le dernier palier de son cycle. Le choix a été fait d'un découpage  $(i, j) = (6, 2)$ . Comme pour [2], ceci permet d'évaluer l'influence de l'augmentation de la vitesse entre l'entrée et la sortie de la chambre et d'autre part d'estimer l'hétérogénéité transversale

La figure 10 est un exemple de résultat du traitement d'image. Les 10 premières secondes correspondent à la période avant tout démarrage de la pompe, les 10 secondes suivantes correspondent au départ du cycle avec le premier palier. A l'expérience, le palier A est très délicat à utiliser. En effet, ce palier est déterminé à partir du maximum de  $D_m$ . Ce qui veut dire qu'il suffit d'une particule assez visible en mouvement sur la vidéo pour que cette dernière crée un pic de maximum qui ne correspond qu'à quelques pixels dans toute la vidéo et probablement pas l'ensemble du sédiment situé sous la chambre.

L'effort a donc été mis sur le palier B. La figure 10 montre que le taux de soustraction additionné relatif présente un premier pic lors du premier démarrage de la pompe puis une partie des particules s'arrête alors même que le taux ne revient pas complètement à zéro même lors des paliers d'arrêt de la pompe. Pour le sédiment calibré (Figure 10a) on note des pics répartis au cours du temps et un taux qui reste inférieur à 15%, ce qui indique une mise en mouvement limitée pour la gamme de débits imposés par la pompe. Pour le sédiment du Clain, on note que le taux reste inférieur à 10% pendant les 50 premières secondes puis augmente fortement pour atteindre 20%

autour de 60 secondes, ce qui correspond à une augmentation de la quantité de sédiments mise en mouvement.

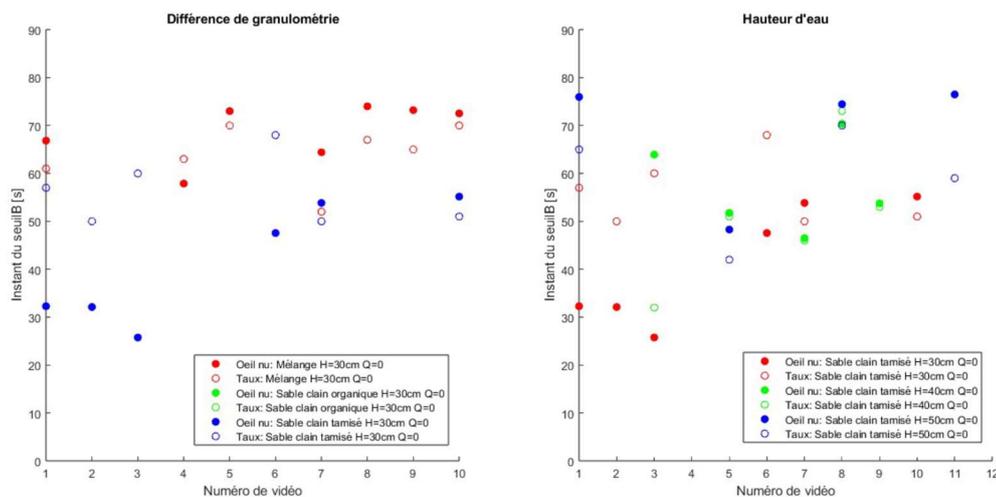


a) Sédiment calibré

b) sable du Clain tamisé

Figure 10 : Exemple de résultats pour un essai sur la hauteur d'eau de 30 cm et un débit nul dans le canal

Nous étudions maintenant l'influence de la granulométrie des sédiments (Figure 11a) et de la hauteur d'immersion du PumpET sur le seuil B (Figure 11b). Les ronds pleins correspondent à la détection à l'œil, les ronds creux aux détections du seuil B par traitement d'images des vidéos. On constate que ce seuil B évolue asymptotiquement au fur et à mesure de la répétition des essais. Il convient de dire que, pour ces essais sans courant, le sédiment était remis en place à la main entre 2 essais. Malgré tout le soin appliqué à cela, on constate ici la difficulté de travailler avec des essais destructeurs (le sédiment érodé n'est jamais remis en place strictement de la même façon). De la même façon, nous avons volontairement ici insisté sur la détermination du seuil. Celui-ci quantifie la quantité de sédiment mis en mouvement. On constate que cette détection reste très délicate notamment avec des sédiments issus du milieu naturel. Enfin, pour de nombreux essais avec le sable du Clain organique (non tamisé, points verts de la figure 11a), il s'est avéré impossible de détecter un seuil quelconque avec le traitement d'images. Cela est dû à la très forte turbidité de l'eau qui empêche d'observer correctement les sédiments et de les analyser. On note peut-être ici une limite de la technique face à l'œil humain puisque, avec la méthode initiale, [2] a pu traiter les sédiments du Loiret. Sur la figure 11b on ne constate pas d'influence claire de la hauteur d'eau sur le seuil B.



(a) Essais sur la granulométrie

(b) Essais sur la hauteur d'eau

Figure 11 – Résultats sans débit pour la récupération du seuil B à l'œil nu ou par taux de soustraction additionné relatif.

## V – Conclusions et perspectives

Les travaux effectués ont permis de mieux connaître le fonctionnement de l'érodimètre de terrain appelé PumpET qui a été développé avec une volonté délibérée de créer un matériel léger et low-cost et avec une démarche empirique.

Les simulations numériques, nous indiquent, qu'avec la configuration actuelle, il faudrait limiter le fonctionnement du PumpET à des régimes tels que le rapport  $V_{m/r}/V_{m,e/p}$  entre la vitesse moyenne de la rivière,  $V_{m/r}$ , et celle de l'écoulement à l'entrée du PumpET entre 0,5 et 2,5 environ. Une solution envisagée est de modifier la forme de l'entrée de la chambre de mesure pour limiter la formation des recirculations et améliorer l'homogénéité transversale de la contrainte de cisaillement à une distance donnée de l'entrée. Lorsque la forme de l'entrée sera établie, les simulations numériques seront utilisées pour déterminer le profil de vitesse dans la chambre du PumpET et le champ de contrainte au niveau du lit pour chaque débit généré par chacun des paliers de la pompe.

L'étude expérimentale montre la nécessité de bien contrôler la charge de la batterie. Une étude sera à mener sur les batteries existantes qui tiendrait mieux la charge et/ou sur comment maintenir la charge sans alourdir l'appareil. De la même manière, la caméra n'est pas collée à la chambre de mesure et des particules peuvent donc circuler entre l'objectif et la zone que l'on souhaite filmer. Diverses idées de déflecteurs et de carénage sont envisagées, là aussi il faudra tenir compte de la masse et de l'impact sur l'hydrodynamique de l'appareil afin qu'il ne devienne pas délicat à manier. Enfin, il reste la question essentielle de ce qu'on appelle le seuil d'érosion. Est-ce quand l'ensemble de la surface du lit sédimentaire est en mouvement ou quand les premières particules se mettent en mouvement ? Si théoriquement on peut comprendre que cette dernière définition est la plus pertinente, on constate une fois de plus combien identifier ces premiers mouvements est délicat !

## Références

- [1] S. Dey and S. K. Ali, (2019), *Bed sediment entrainment by streamflow: state of the science*, *Sedimentology*, 66, 1449-1485, <https://doi.org/10.1111/sed.12566>
- [2] F. Larrarte, C. Chevalier, C. Minatchy, H. Chollet, (2022), *Pump Erosion Test : un érodimètre "low cost" de terrain*, 18èmes journées de l'hydrodynamique, Poitiers, Novembre 22-24.
- [3] ANSYS Fluent Theory Guide, Release 18.2, (2017), Ansys Inc., Canonsburg.
- [4] M. Kadivar, D. Tormey, G. McGranaghan, (2021), *A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories*, *Int. J. of Thermofluids*, 100077, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100077>.
- [5] T. Cebeci, P. Bradshaw, (1977), *Momentum Transfer in Boundary Layers*, McGraw-Hill, New York, ISBN : 0070103003, 9780070103009
- [6] D. Coles, (1956), *The law of the wake in the turbulent boundary layer*, *J. Fluid Mech*, 191-226, <https://doi.org/10.1017/S0022112056000135>
- [7] J. Cui, V. C. Patel., C-L. Lin, (2003), *Large-eddy simulation of turbulent flow in a channel with rib roughness*, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.24, 372-388, [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(03\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(03)00002-X)
- [8] Y. Okazaki, Y. Takase., Y. Kuwata., K. Suga, (2022), *Turbulent channel flows over porous rib-roughened walls*, *Experiments in Fluids*, 63-66, <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03415-8>
- [9] M. F. Tachie, D. J. Bergstrom, R. Balachandar, (2000), *Rough wall turbulent boundary layers in shallow open channel flow*, *J. Fluids Engineering*, Vol.122, 533-541, <https://doi.org/10.1115/1.1287267>
- [10] M. Vah, (2019), *Transport sédimentaire induit par un courant : effet du disponible sédimentaire* ». thèse de doctorat, Normandie Université.