



HAL
open science

Érosion d'un lit granulaire par un jet

Sarah Badr, Georges Gauthier, Philippe Gondret

► **To cite this version:**

Sarah Badr, Georges Gauthier, Philippe Gondret. Érosion d'un lit granulaire par un jet. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440687

HAL Id: hal-03440687

<https://hal.science/hal-03440687>

Submitted on 22 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Erosion d'un lit granulaire par un jet

S. BADR, G. GAUTHIER, P. GONDRET

Laboratoire FAST, Universités Paris 6 et 11 et CNRS, Bât. 502, Campus universitaire, 91405 ORSAY

Résumé :

Nous étudions expérimentalement l'érosion d'un lit sédimentaire modèle par un jet dans une configuration quasi bidimensionnelle : le jet est une fine nappe liquide qui impacte perpendiculairement un empilement de billes immergées monodisperses en taille et densité. Nous caractérisons le seuil d'érosion en faisant varier la distance d'impact du jet sur le sédiment, la taille des grains et la viscosité du fluide. Trois régimes d'érosion ont été mis en évidence. Des visualisations montrent que ces régimes sont liés à la nature du jet (laminaire stationnaire, instationnaire ou turbulent). Dans le domaine exploré des paramètres, nous montrons que le seuil d'érosion est bien décrit par un nombre de Shields inertiel critique basé sur la vitesse locale de l'écoulement.

Abstract :

We study experimentally the erosion process of a model granular bed by a fluid jet in a quasi bidimensional configuration: the jet is a thin liquid sheet impacting normally on an immersed packing of monodisperse beads. The erosion threshold is investigated by varying the distance between the jet and the bed, the grain size and fluid viscosity. Three regimes are put in light and visualisations show that these regimes come from the jet state: laminar, unstationary or turbulent. In the explored range of parameters, we show that the erosion threshold is well described by an inertial Shields number based on the local jet flow velocity.

Mots clefs : milieux granulaires, suspension, érosion, jet

1 Introduction

Le phénomène d'érosion est important à comprendre tant dans les milieux naturels, pour la géomorphologie de la Terre et des planètes ou astéroïdes, que dans un certain nombre d'activités humaines tels que l'agriculture, le génie civil ou encore le domaine aérospatial [1,2]. L'érosion peut avoir lieu dans différentes configurations d'écoulements, naturels ou contrôlés, laminaires ou turbulents, homogènes ou inhomogènes, tangentiels ou perpendiculaires au lit granulaire [1]. La caractérisation de la stabilité des sols par des tests reconnus et fiables est un enjeu important dans le diagnostic et l'appréhension des risques liés à la conception d'ouvrages [1]. Le « Jet Erosion Test » est un de ces tests possibles [3] et nous nous intéressons ici à la compréhension fine du seuil d'érosion dans une configuration de jet modèle quasi bidimensionnelle stationnaire, clairement différente de la situation d'érosion/resuspension d'un sédiment par l'impact d'un anneau de vorticité créé par un jet impulsif [4]. De nombreuses études ont porté sur la caractérisation des cratères d'érosion dans des régimes stationnaires très loin du seuil, en étudiant notamment la forme du cratère, sa profondeur et son diamètre [2,5-6], par des jets d'air [2] ou d'eau [3,5-6], cylindriques [2,5] ou plans [6]. Toutes ces études mettent en évidence la pertinence du nombre de Shields inertiel ou équivalent et de la distance adimensionnée entre la sortie du jet et le sédiment, mais la relation entre ses deux nombres sans dimensions n'est pas clairement établie, ni la caractérisation précise du seuil qui font ainsi l'objet de la présente étude.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Fig. 1) est constitué d'un lit de billes de verre, de masse volumique $\rho_s = 2,5 \cdot 10^3$ kg/m³ et diamètre d , immergés dans un fluide de masse volumique ρ et viscosité η , et soumis à l'action d'un jet vertical du même fluide issu d'un injecteur plan d'épaisseur $b = 4$ mm situé à la distance l du lit de grains. L'ensemble est contenu dans une cuve parall  l  pip  dique de hauteur $H = 50$ cm, de largeur $L = 20$ cm et d'épaisseur $w = 3$ cm.

Ces billes de verre tamisées présentent une petite dispersion relative de l'ordre de 10% autour du diamètre moyen d . La gamme explorée ($0,1 < d < 1$ mm) est telle que la taille des grains est significativement plus petite que la taille du jet ($d/b < 1$). Le fluide est le plus souvent de l'eau, mais des solutions aqueuses de glycérol ont aussi été utilisées pour faire varier la viscosité cinématique $\nu = \eta/\rho$ du fluide dans la gamme $10^{-6} < \nu < 4 \cdot 10^{-6}$ m²/s sans faire varier significativement sa masse volumique $\rho \approx 10^3$ kg/m³. L'injecteur est un tube de longueur 20 cm et de section intérieure rectangulaire d'épaisseur $b = 4$ mm et de largeur $w_j = 2,4$ cm légèrement inférieure à la largeur w de la cuve. Le débit d'injection Q est varié au moyen d'une pompe à engrenages permettant une circulation du fluide sans à-coups significatifs. Après étalonnage de la pompe dans les conditions d'utilisation, la vitesse moyenne $U_j = Q/wb$ du jet à la sortie de l'injecteur est donc connue et variable dans la gamme 0-1 m/s.

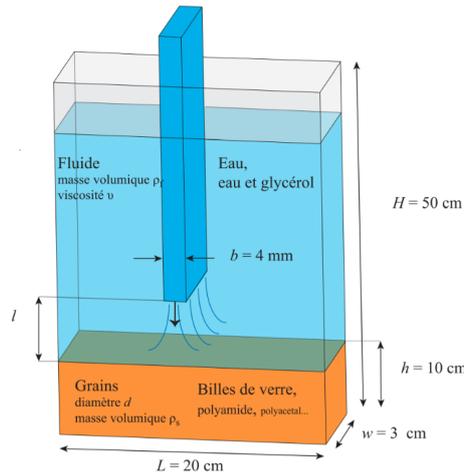


FIG. 1 – Schéma du dispositif expérimental.

Compte tenu des nombreux paramètres de l'expérience, un grand nombre de paramètres sans dimension doivent être considérés, mais nous nous focaliserons sur la variation des 3 paramètres de contrôle suivants :

$$\text{Re}_j = \frac{U_j b}{\nu} \quad (1)$$

$$\text{Sh}_j = \frac{\rho U_j^2}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (2)$$

$$l^* = \frac{l}{b} \quad (3)$$

où Re_j est le nombre de Reynolds qui caractérise le rapport entre les effets d'inertie et visqueux du fluide dans l'écoulement de jet, Sh_j est le nombre de Shields qui caractérise le rapport entre la force fluide en sortie de jet sur un grain et son poids apparent, et l^* est la distance normalisée de l'injecteur au lit granulaire. Il est à noter que le nombre de Shields est ici basé sur les contraintes inertielles du fluide et non pas sur les contraintes visqueuses, ce que nous justifierons par la suite. Les autres paramètres sans dimensions telles que les rapports d'aspect L/b , w/b , H/b , h/b , d/b ont été montrés pour certains ou peuvent être considérés pour d'autres comme d'influence négligeable ou en tout cas secondaire dans le problème en question.

Dans la suite, nous présentons donc les résultats de seuil d'érosion en fonction de ces trois paramètres sans dimension dont nous montrerons qu'ils sont les paramètres pertinents. Les expériences concernant la détermination du seuil d'érosion ont été conduites de la façon suivante. Les grains sont d'abord fluidisés par une injection ascendante homogène de fluide à travers le fond poreux de la cellule. La fluidisation est ensuite stoppée brutalement et les grains sédimentent en constituant un lit de fraction solide reproductible pour chaque expérience et de surface remarquablement plane. L'injecteur réglé à la distance l du lit souhaitée, la vitesse débitante U_j du jet est graduellement augmentée jusqu'à ce que des grains soient observés comme délogés à l'aplomb du jet. La procédure est répétée une dizaine de fois pour quantifier la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne.

3 Résultats expérimentaux

Les mesures de vitesse au seuil d'érosion en fonction de la distance de l'injecteur au lit granulaire sont présentées sur la figure 2a en terme de nombre de Reynolds pour deux diamètres de grains ($d = 0,25$ et 1 mm) et deux viscosités de fluides ($\nu = 10^{-6}$ et $4 \cdot 10^{-6}$ m²/s). Ainsi que l'on pouvait s'y attendre, la vitesse nécessaire à l'érosion (Re_j) augmente lorsque la distance du jet au sédiment augmente, avec une allure cependant complexe qui laisse présager l'existence de différents régimes. Le comportement du jet est *de facto* différent selon le nombre de Reynolds et la distance du jet au sédiment. Pour un jet « libre », loin de toute paroi ($l^* \gg 1$), la transition d'un régime de jet laminaire à un jet turbulent a lieu pour un nombre de Reynolds critique Re_{jc} de quelques centaines ($10^2 < Re_{jc} < 10^3$ selon [7]). Pour un jet très proche de la surface du sédiment ($l^* < 5$), les couches de mélange n'ont pas le temps ou plutôt l'espace de se développer et le cœur du jet reste potentiel à l'impact de la paroi quelque soit le nombre de Reynolds. Pour des distances intermédiaires ($8 < l^* < 35$), le jet présente des oscillations périodiques auto-entretenues dans la gamme $200 < Re_j < 400$ [8]: le jet n'est plus libre mais couplé à l'écoulement qu'il crée par impact sur la surface du sédiment. Nous avons reporté sur la figure 2a les zones indicatives correspondant à ces trois régimes de jet : jets libres laminaire ou turbulent, éventuellement séparés par le régime de jet couplé, dont les visualisations sont montrées respectivement en figures 2b, d et c. Pour un sédiment constitué de billes de diamètre $d = 0,25$ mm (respectivement 1 mm) immergées dans un liquide 4 fois plus visqueux que l'eau (respectivement dans de l'eau), nos données de seuil d'érosion correspondent à un jet uniquement laminaire (respectivement turbulent). Cependant, pour les billes de diamètre $d = 0,25$ mm immergées dans l'eau, le jet présente successivement les trois régimes au seuil d'érosion.

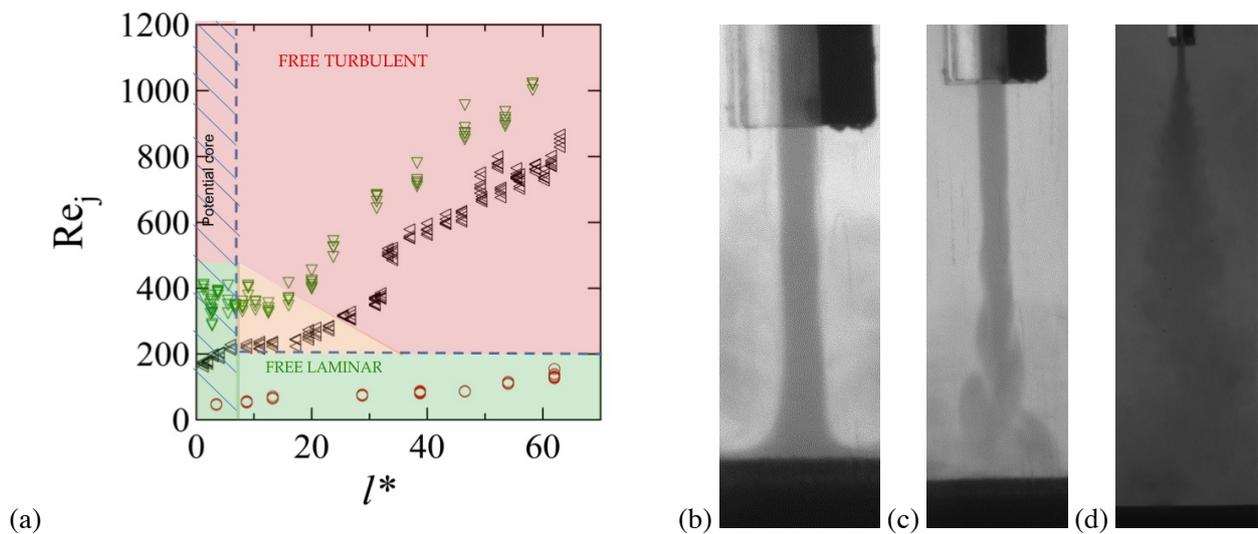


FIG. 2 – (a) Nombre de Reynolds Re_j du jet au seuil d'érosion en fonction de la distance normalisée l^* jet-sédiment pour des billes de verre de diamètre (\triangleleft) $d = 0,25$ mm et (∇) 1 mm dans de l'eau ($\nu = 10^{-6}$ m²s⁻¹), et (\circ) des billes de diamètre $d = 0,25$ mm dans un mélange eau-glycérol ($\nu = 4 \cdot 10^{-6}$ m²s⁻¹). (b, c, et d) Visualisations du jet au seuil d'érosion dans les régimes (b) laminaire libre, (c) confiné oscillant et (d) turbulent libre pour respectivement (l^* ; Re_j) \approx (8 ; 230), (14 ; 280) et (60 ; 10^3).

Avant d'étudier la conséquence du régime de jet sur l'érosion, intéressons-nous au nombre de Shields critique d'érosion, dont les valeurs en fonction de l^* sont reportés en figure 3. L'ensemble des données se rassemble sur une courbe maitresse, ce qui confirme le nombre de Shields inertiel Sh_j comme paramètre de contrôle de l'érosion, ainsi que l'ont montré de précédentes études [2,5-6]. Cependant, la figure 3 révèle deux comportements distincts : un nombre de Shields quasi constant à des distances jet-sédiment modérées ($l^* < 20$), suivi d'une forte croissance au-delà ($Sh_j \sim l^*$ pour $l^* > 20$). Nous montrons dans la suite que cette différence de comportement est liée au régime du jet, laminaire ou turbulent.

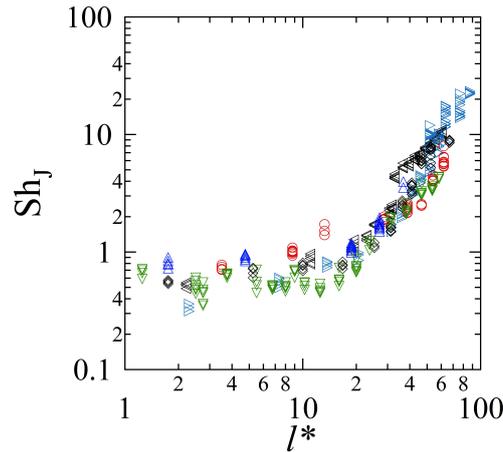


FIG. 3 – Nombre de Shields Sh_J au seuil d'érosion en fonction de la distance adimensionnée l^* jet-sédiment pour des billes de verre de différents diamètres d et fluides de différentes viscosités ν : (\square) $d = 0,1$ mm, (\triangleleft) $d = 0,25$ mm, (\diamond) $d = 0,35$ mm, (\triangle) $d = 0,5$ mm et (∇) $d = 1$ mm dans de l'eau ($\nu = 10^{-6}$ m²/s) et $d = 0,25$ mm dans mélanges eau-glycérol (\triangleright) $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m²s⁻¹ et (\circ) $\nu = 4 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

4 Modèle d'érosion par jet laminaire ou turbulent

Les jets en nappe laminaires ou turbulents, issus de conduit rectangulaire à grand rapport d'aspect ($w/b \gg 1$), sont assez bien décrits par des modèles auto-similaires 2D [9]. Le développement du champ de vitesse avec la distance à l'origine du jet peut être décomposé en deux régions pour les jets laminaires et trois régions pour les jets turbulents. Ces régions sont définies par le taux de décroissance spatiale de la vitesse axiale u_0 (ou sa moyenne en régime turbulent). En sortie d'injecteur, le jet est constitué de deux couches de mélange séparées par un cœur potentiel dans lequel $u_0(x)$ est constant, jusqu'à des distances à l'origine du jet $x/b \sim 5$. Pour $5 < x/b < 60$, u_0 se comporte de la même manière qu'un jet auto-similaire à deux dimensions dont l'origine n'est pas la sortie de l'injecteur mais est située à la distance, notée ici λ , en amont de la sortie, selon le concept d'« origine virtuelle » [9-10], de telle sorte que la distance effective à considérer est $x+\lambda > x$ ($\lambda > 0$). Enfin, pour les régime turbulents à suffisamment grande distance ($x/b > 60$), le jet se comporte comme un jet axisymétrique dont l'origine virtuelle est située en aval ($\lambda < 0$) à la fin du cœur potentiel [11]. Il est à noter par ailleurs que pour des jets turbulents confinés par des parois latérales, les positions de l'origine virtuelle et du lieu de transition 2D/axisymétrique, ainsi que le taux de décroissance de la vitesse moyenne ne font pas consensus [12-13].

Dans le régime libre laminaire, nous considérerons que la vitesse locale $u_l = u_0(l)$ au niveau de la surface du lit varie avec la distance l à la sortie de l'injecteur suivant la loi suivante donnée par un modèle auto-similaire 2D [9] :

$$\frac{u_l}{U_J} = \frac{3}{10} \left(\frac{5 \text{Re}_J}{l^* + \lambda^*} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

où l'origine virtuelle dépend du nombre de Reynolds selon la loi $\lambda^* = \lambda/b = 0,026 \text{Re}_J$ [14]. La figure 4a présente, en échelle logarithmique, l'évolution de la vitesse du jet au seuil d'érosion, U_J , en fonction de $l^* + \lambda^*$, pour un sédiment constitué de billes de verre de 0,25 mm de diamètre immergées dans un mélange eau-glycérol de viscosité cinématique $\nu = 4 \cdot 10^{-6}$ m²/s. L'alignement sur une droite de pente 1/4 des points expérimentaux correspondant au régime laminaire montre qu'au seuil d'érosion la vitesse locale u_l est constante.

Dans le régime de jet libre turbulent, nous considérerons que la vitesse locale u_l à la surface du sédiment varie avec la distance l suivant la loi suivante [15] :

$$\frac{u_l}{U_J} = \frac{K}{(l^* + \lambda^*)^{1/2}}, \quad (2)$$

où $K \approx 0,2$ pour des jets rectangulaires confinés de rapport d'aspect $w_j/b = 6$ [15] dans la gamme de Re considérée, et $\lambda^* < 0$. La figure 4b présente l'évolution en échelle logarithmique de la vitesse de sortie du jet U_j au seuil d'érosion en fonction de $l^* + \lambda^*$ pour un sédiment constitué de billes de verre de 1 mm de diamètre. L'alignement sur une droite de pente cette fois 1/2 des points expérimentaux correspondant au régime turbulent montre qu'au seuil d'érosion la vitesse locale u_l est encore une fois constante.

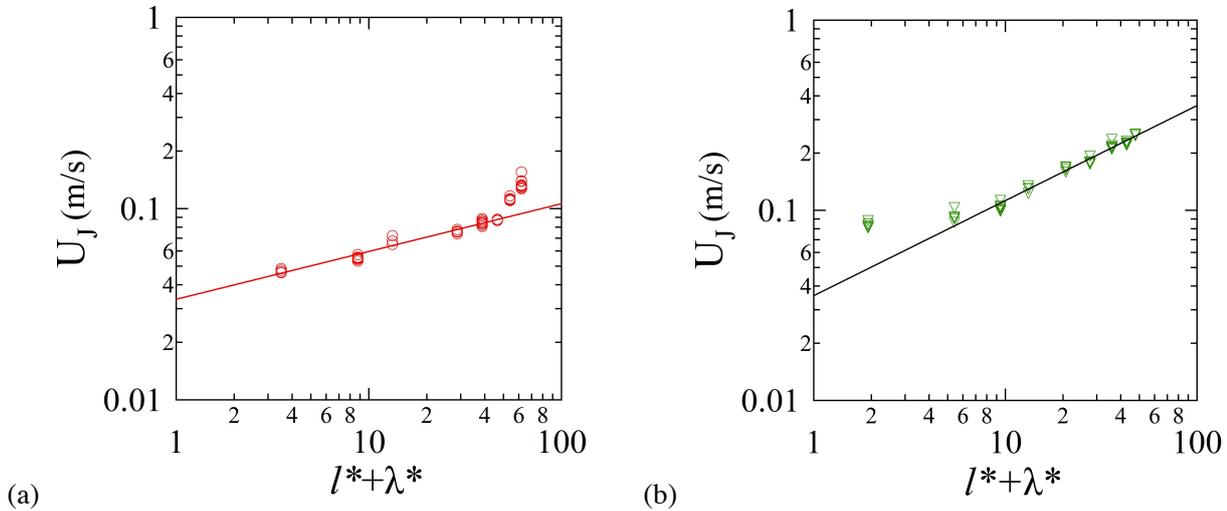


FIG. 4 — Évolution de la vitesse du jet U_j au seuil d'érosion en fonction de la distance adimensionnée à l'origine virtuelle du jet $l^* + \lambda^*$ pour (a) des billes de diamètre $d = 0,25$ mm immergées dans un mélange eau-glycérol ($\nu = 4 \cdot 10^{-6}$ m²/s) et pour (b) des billes de diamètre $d = 1$ mm immergées dans l'eau ($\nu = 10^{-6}$ m²/s). Les traits continus (—) correspondent aux modèles auto-similaires laminaire (éq. 1, —) ou turbulent (éq. 2, ---).

La détermination de la vitesse locale critique d'érosion u_l dans les régimes laminaire et turbulent correspondant à tous les jeux de données permet de calculer le nombre de Shields local critique $Sh_l = \rho u_l^2 / (\rho_s - \rho)gd$ correspondant à chaque cas. La figure 5 présente la dépendance des valeurs obtenues pour Sh_l en fonction du nombre de Reynolds particulaire local $Re_p = u_l d / \nu$. Les valeurs, bien que quelque peu dispersées, sont centrées autour de $Sh_l = 1$ dans la gamme de Re_p explorée dans cette étude ($3 < Re_p < 10^2$). Le fait que le nombre pertinent caractérisant l'érosion par jet soit un nombre de Shields inertiel est cohérent compte tenu des valeurs obtenues pour le nombre de Reynolds particulaire ($Re_p > 1$). Les valeurs critiques d'érosion qui seraient données par un nombre de Shields visqueux (basé sur la force visqueuse $\eta u_l d$) sont de fait inférieures avec une décroissance en $1/Re_p$: le nombre de Shields visqueux n'est pas pertinent dans cette configuration de jet, contrairement aux configurations d'érosion tangentielle [16-17].

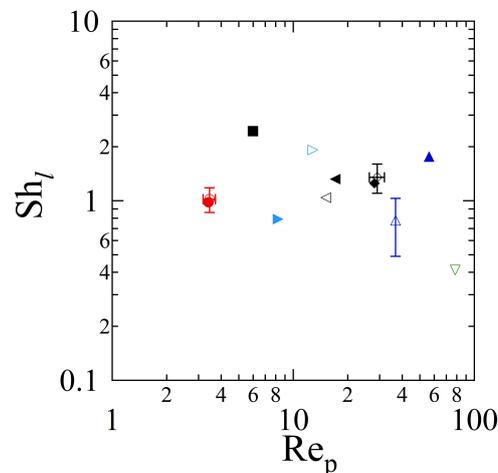


FIG. 5 — Évolution du nombre de Shields local Sh_l en fonction du nombre de Reynolds particulaire local Re_p . Mêmes symboles qu'en fig. 3, avec la convention supplémentaire de symboles pleins (resp. ouverts) pour les points issus des données de régime laminaire (resp. turbulent).

5 Conclusions

Nous avons étudié le seuil d'érosion, par un jet perpendiculaire, d'un sédiment constitué de billes de verre en fonction de la distance jet-sédiment. Nous avons montré que le seuil d'érosion est bien représenté par un nombre de Shields critique Sh_d d'érosion d'origine inertielle, qui augmente de manière non uniforme avec la distance adimensionnée jet-sédiment l^* . Cette évolution non uniforme est liée à l'évolution spatiale du jet et à son éventuelle transition à la turbulence. Par des modèles auto-similaires de jet laminaire ou turbulent suivant les cas, la vitesse locale de l'écoulement au niveau de l'impact sur le sédiment peut être déterminée et montre que le nombre de Shields inertiel *local* Sh_l caractérise bien le seuil d'érosion dans cette configuration d'écoulement de jet, avec une valeur constante autour de l'unité dans la gamme de nombre de Reynolds particulaire observée ($1 < Re_p < 10^2$). Cette étude au seuil pourra servir ensuite à mieux comprendre le Jet Erosion Test au-delà du seuil [18].

Les auteurs tiennent à remercier L. Auffray, P. Jenffer, G. Marteau et R. Pidoux pour la réalisation du dispositif expérimental. Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'ANR (projet STABINGRAM 2010-BLAN-0927-01) et de discussions fructueuses avec D. Doppler, P. Philippe, J.-Y. Delenne et S. Bonelli.

References

- [1] Erosion des géomatériaux : érosion interne et de surface, éditions Lavoisier sous la direction de S. Bonelli, 2012.
- [2] Hanson G.J. & Cook K.R., Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility *in situ*, Appl. Eng. Agri. **20**:4, 454-462, 2004.
- [3] Metzger P.T., Immer C.D., Donahue C.M., Vu B.M., Latta R.C. & Deyo-Svensden M., Jet-induced cratering of a granular surface with application to lunar spaceports, J. Aerospace Eng., 2, issue 1, technical papers, 2009.
- [4] Munro R.J., Bethke N. & Dalziel S.B., Sediment resuspension and erosion by vortex ring, Phys. Fluids **21**, 046601, 2009.
- [5] Rajaratman N. & Beltaos S., Erosion by Impinging Circular Jets, Procs. ASCE, J. Hydr. Div., 103, 1191-1205, 1977.
- [6] Rajaratnam N., Erosion by plane turbulent jets, J. Hydraul. Res., **19**, 339-358, 1981.
- [7] Ho C.M. & Huerre P., Perturbated free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech., 16, 365-424, 1984.
- [8] Maurel A., Ern P., Zielinska B.J.A. & Wesfreid J.E., Experimental study of self-sustained oscillations in a confined jet, Phys. Rev. E, 54, 3643-3651, 1996.
- [9] Triton D.J., Physical fluid dynamics (Oxford, 2nd édition, 1988).
- [10] Kotsovinos N.E., A note on the spreading rate and the virtual origin of a plan turbulent jet, J. Fluid Mech. **77**, 305-311, 1976.
- [11] Krothapalli A., Baganoff D. & Karamcheti K., On the mixing of rectangular jets, J. Fluid Mech. **107**, 201-220, 1981.
- [12] Deo R.C., Nathan G.I. & Mi J. Comparison of turbulent jets issuing from rectangular nozzles with and without sidewalls, Exp. Therm. Fluid Sci. **32**, 596-606, 2007.
- [13] Alnahal M., Cavo A., Romeos A., Perrakis K. & Panidis T., Experimental investigation of the effect of endplates and sidewalls on the near field development of a smooth contraction rectangular jet, EJM B/Fluids **30**, 451-465, 2011.
- [14] Revuelta A., Sanchez A. L. & Linan A., The virtual origin as a first-order correction for the far-field description of laminar jets, Phys. Fluids, 14, 1821, 2002.
- [15] Chua, L.P. & Lua, A.C., Measurements of confined jets, Phys. Fluids **10**, 3137-3144, 1998.
- [16] Loiseleux T., Gondret P., Rabaud M. & Doppler D., Onset of erosion and avalanche for an inclined granular bed sheared by a continuous laminar flow, Phys. Fluids, 17, 103304, 2005.
- [17] Ouriemi M., Aussillous P., Médale M., Peysson Y. & Guazzelli E., Determination of the critical Shields number for particle erosion in laminar flow, Phys. Fluids, 19, 061706, 2007.
- [18] Mercier F. Bonelli S., Anselmet F., Pinettes P., Courivaud J.-R. & Fry J.-J., On the numerical modelling of the Jet Erosion Test, ICSE6 Proceedings, Paris, 2013.