

# Motifs d'érosion dans le sillage d'un cylindre

Florent Lachaussée<sup>1</sup>, Yann Bertho<sup>1</sup>, Cyprien Morize<sup>1</sup>, Alban Sauret<sup>2</sup> & Philippe Gondret<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire FAST, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91405, Orsay, France

<sup>2</sup> Laboratoire SVI, CNRS, Saint-Gobain, 39 quai Lucien Lefranc, F-93303 Aubervilliers, France

[florent.lachaussée@u-psud.fr](mailto:florent.lachaussée@u-psud.fr)

**Résumé.** Nous observons expérimentalement deux motifs d'érosion différents à la surface d'un lit granulaire au voisinage d'un cylindre vertical, lorsqu'on le soumet à un écoulement d'eau suffisamment rapide. Le motif d'affouillement classique observé au pied du cylindre, dû au tourbillon en « fer à cheval », apparaît pour une vitesse critique  $V_h$  inférieure à la vitesse critique d'érosion sans cylindre  $V^*$ . Mais nous observons également un autre motif en aval du cylindre consistant en deux fosses symétriques allongées ressemblant à des « oreilles de lapin », dues aux tourbillons de sillage. Ce nouveau motif d'affouillement peut s'observer à des vitesses plus faibles que l'affouillement induit par tourbillon en fer à cheval, au-delà d'une vitesse critique  $V_b < V_h$ , avec un temps de formation nettement plus long. Il nous est possible de séparer l'effet des différents tourbillons en remplaçant une partie du lit granulaire amont par un fond rigide non érodable.

**Abstract.** We report on two different patterns that can be experimentally observed at the bed surface in the vicinity of a vertical cylinder when submitted to a strong enough steady water flow. The classical scour pattern observed at the cylinder foot and due to the “horseshoe” vortex around occurs at a critical velocity  $V_h$  below the critical velocity  $V^*$  for erosion without any cylinder. In addition we also observe another pattern downstream the cylinder that consists of two symmetrical ovoid holes having “bunny ears” shape, due to wake vortices. This new scour pattern can be observed at lower velocities than the horseshoe scour, above a critical velocity  $V_b < V_h$ , with a timescale of formation much larger than the one of horseshoe scour. We can separate the effects of the different vortices by replacing part of the granular bed with a rigid non-erodible floor.

## 1 Introduction

Les phénomènes d'érosion et de transport de sédiments peuvent représenter une menace importante pour les activités humaines, les infrastructures et les écosystèmes. Par exemple, au voisinage d'une pile de pont, d'un mât d'éolienne ou encore d'une plateforme offshore, l'érosion est amplifiée. Ce phénomène, appelé affouillement, peut endommager la structure et causer son effondrement. En raison des risques encourus, de multiples études ont été menées à l'aide de canaux hydrauliques de grandes dimensions [1]. La description physique du phénomène d'érosion au voisinage de structures reste cependant incomplète à ce jour. La raison en est que le couplage entre la dynamique du fluide et le transport de particules solides est mal quantifié et que l'écoulement autour du cylindre est complexe [2–4]. La présence de la structure perturbe l'écoulement et est à l'origine de plusieurs tourbillons : un tourbillon en « fer à cheval » au pied de l'obstacle et des tourbillons de sillage en aval. En raison de la présence de ces tourbillons, la vitesse de l'eau augmente localement, ce qui provoque l'érosion à proximité de l'obstacle. La complexité physique du phénomène rend difficiles les approches numériques, qui progressent néanmoins, notamment grâce aux développements récents de méthodes couplant des simulations aux grandes échelles (LES) pour le fluide et des éléments discrets (DEM) pour le milieu granulaire [5].

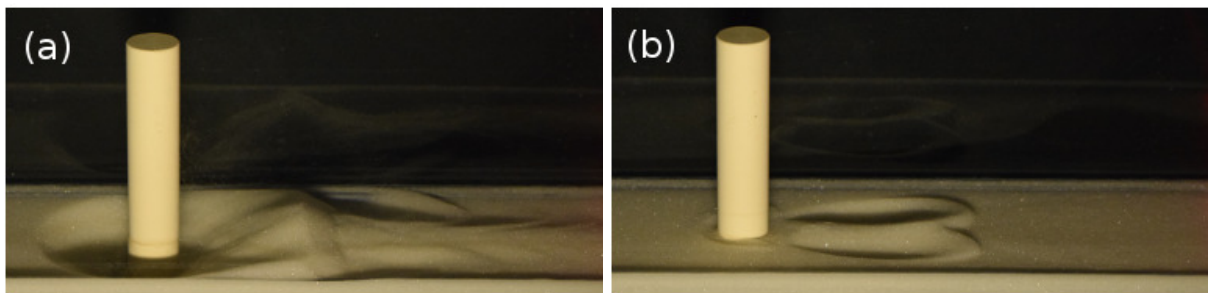
Dans cet article, nous nous intéressons au cas simplifié de l'affouillement au pied d'un cylindre circulaire. Cette géométrie est classique dans les études portant sur l'affouillement et trouve de nombreuses applications dans le génie civil, en milieu fluvial ou maritime. Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus dans un montage modèle à petite échelle qui facilite les mesures et permet un changement relativement aisé des paramètres physiques.

## 2 Dispositif expérimental

Le montage est constitué d'un canal hydraulique fermé, en forme d'hippodrome, d'environ 3,6 m de long et  $W = 100$  mm de large, composé de deux parties linéaires de 900 mm de long séparées par deux parties courbées de rayon 300 mm. L'écoulement de l'eau (masse volumique  $\rho = 1000$  kg  $\cdot$  m $^{-3}$  et hauteur  $h = 160$  mm) se fait à l'aide d'une roue à aubes située dans l'une des sections rectilignes du canal. Les mesures sont menées en aval d'un nid d'abeille dans l'autre section rectiligne, au fond de laquelle se trouve le milieu granulaire constitué de billes de verre (masse volumique  $\rho_s = 2500$  kg  $\cdot$  m $^{-3}$  et diamètre moyen  $d = (270 \pm 30)$   $\mu$ m) placé dans un tiroir de 600 mm de long et de profondeur 40 mm. Un cylindre de diamètre  $D = 20$  mm dépasse du milieu granulaire d'une hauteur  $H = 90$  mm, inférieure à la hauteur d'eau. L'obstacle est fixé au fond du lit granulaire aux deux tiers de la section d'essai, point que nous prenons comme origine du repère de référence horizontal  $(x, y)$ , où  $x$  est dans la direction de l'écoulement et  $y$  dans la direction transverse. Les parois verticales de la section d'essai sont en verre, permettant une visualisation directe de l'affouillement au voisinage du cylindre. Au-dessus du canal, un profilomètre laser est monté sur une platine de déplacement horizontale pour scanner la topographie du lit  $\xi(x, y)$ . Pour éviter que les mouvements de la surface libre ne viennent perturber les mesures de  $\xi$ , un plafond de verre est placé à la surface de l'eau au-dessus du lit granulaire.

En modifiant la vitesse de rotation de la roue à aubes, on contrôle la vitesse  $V$  de l'écoulement dans la gamme  $0,05 \lesssim V \lesssim 0,25$  m  $\cdot$  s $^{-1}$ . Le nombre de Reynolds typique associé à la largeur du canal  $W$  est  $Re_W \simeq 10^4$ , correspondant à un régime turbulent. Le nombre de Reynolds de l'écoulement basé sur le diamètre du cylindre  $D$  est  $Re_D \simeq 10^3$ , bien au-delà de 69, valeur critique de l'instabilité de Bénard–von Kármán pour un cylindre infini entre deux parois verticales avec le même rapport de blocage  $D/W = 0,2$  [6]. L'écoulement autour du cylindre est donc bien turbulent, avec d'importants tourbillons de sillage instationnaires. Le nombre de Reynolds particulière est  $Re_d \simeq 50$ , correspondant plutôt à un régime inertiel. Le nombre de Froude  $Fr = U/\sqrt{gh}$ , défini comme le rapport de la vitesse de l'écoulement avec celle des ondes de surface, est inférieur à 0,2 : l'écoulement est sous-critique et les effets de surface libre négligeables.

Avant chaque expérience, le lit granulaire est remué puis nivelé afin d'avoir une surface initiale plane et horizontale. Le cylindre est ensuite placé sur son support sans perturber le lit granulaire. Puis l'écoulement est lancé à la vitesse  $V$  désirée. Le profilomètre laser est alors démarré pour mesurer la topographie instantanée du lit  $\xi(x, y, t)$ , où  $\xi(x, y, t)$  est la variation d'altitude au point  $(x, y)$  entre l'état initial avant écoulement et l'instant  $t$ . Ces relevés sont faits sans interrompre l'écoulement, à intervalles  $\Delta t$  réguliers et adaptés à la dynamique d'érosion.

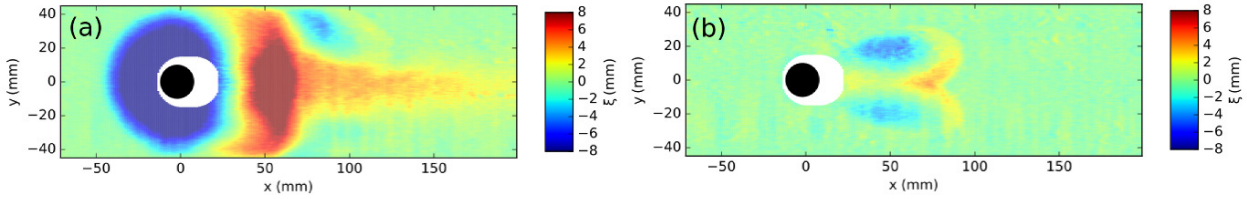


**FIGURE 1.** Photographie des deux motifs d'affouillement au voisinage du cylindre, l'écoulement venant de la gauche : (a) fosse creusée par le tourbillon en fer à cheval,  $Re_D \simeq 3,6 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 8$  et  $t \simeq 6 \times 10^2$  s ; (b) fosses en oreilles de lapin,  $Re_D \simeq 2,3 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 3,3$  et  $t \simeq 4,76 \times 10^4$  s.

### 3 Résultats expérimentaux

En l'absence d'obstacle, on observe une érosion du lit granulaire au-delà d'un nombre de Shields critique  $Sh^* \simeq 10$ , où le nombre de Shields  $Sh = \rho V^2 / \Delta \rho g d$  est défini en utilisant la vitesse  $V$  de l'écoulement loin du fond. On utilise ici un nombre de Shields inertiel, puisque  $Re_d > 1$ . Ce nombre est différent du nombre de Shields local que l'on pourrait obtenir en connaissant précisément la contrainte exercée par le fluide sur le fond [7, 8]. Nos études sont menées en condition *clear-water*, c'est-à-dire que l'érosion ne se produit qu'au voisinage du cylindre ( $Sh < Sh^*$ ).

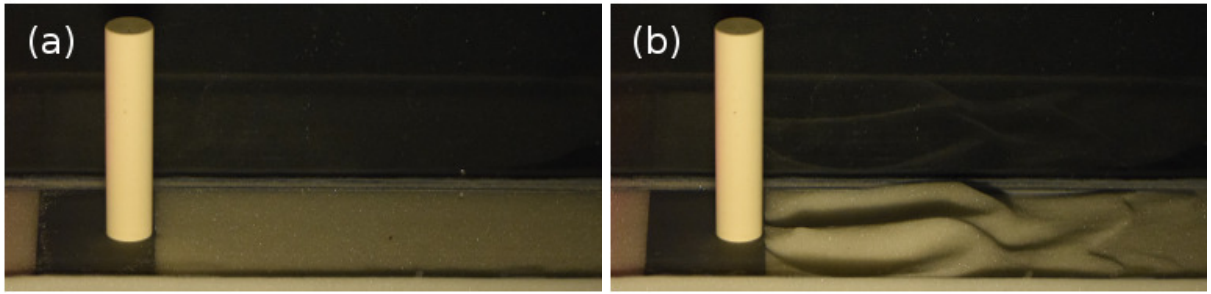
On observe différents motifs d'érosion, que l'on photographie à travers la paroi du canal (Fig. 1) et dont on relève la topographie grâce au profilomètre laser (Fig. 2). Lorsque la vitesse d'écoulement est importante, tout en restant suffisamment faible pour demeurer en condition *clear-water* ( $4 \lesssim Sh \lesssim 10$ ), on observe une figure d'érosion telle que celles classiquement rapportées dans la littérature [3], à savoir une fosse d'affouillement entourant le cylindre (Fig. 1 (a) et Fig. 2 (a)). Celle-ci est essentiellement creusée par le tourbillon en fer à cheval intense qui se forme au pied de la pile. L'évolution de la morphologie du lit est rapide, ici de l'ordre d'une heure. Pour des vitesses d'écoulement plus faibles ( $2 \lesssim Sh \lesssim 4$ ), l'érosion se concentre plus loin en aval de l'obstacle. Deux fosses allongées, avec une forme remarquable d'« oreilles de lapin », apparaissent alors sous l'effet des tourbillons de sillage (Fig. 1 (b) et Fig. 2 (b)). Ces motifs mettent plus de temps à se former, la dynamique étant ici d'une dizaine d'heures. Les fosses en « oreilles de lapin » diffèrent des motifs observés à l'aval d'un obstacle par Auzerais *et al.* [9] : ceux-ci n'ont ni la même forme, ni la même localisation et coexistent avec la fosse d'affouillement classique.



**FIGURE 2.** Relevés topographiques  $\xi(x, y)$  pour les deux motifs d'érosion, avec les mêmes paramètres que pour la figure 1 : (a) fosse creusée par le tourbillon en fer à cheval au pied de l'obstacle,  $Re_D \simeq 3,6 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 8$  et  $t \simeq 6 \times 10^2$ ; (b) fosses en oreilles de lapin en aval du cylindre,  $Re_D \simeq 2,3 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 3,3$  et  $t \simeq 4,76 \times 10^4$ . Le cercle noir correspond à l'emplacement du cylindre. La zone blanche est la région qui n'est pas détectée par le profilomètre.

Dans notre expérience, il est possible d'étudier séparément l'effet de ces différents tourbillons (sillage et fer à cheval) en remplaçant une partie du lit granulaire amont par un fond rigide non érodable au voisinage du cylindre. Ceci permet d'inhiber l'érosion due au tourbillon en fer à cheval, laissant seuls les tourbillons de sillage agir. On est ainsi en mesure d'obtenir des motifs en oreilles de lapin à des vitesses d'écoulement élevées, pour lesquelles on aurait obtenu une fosse classique en l'absence de sabot rigide (Fig. 3 et Fig. 1 (a)). Ceci permet d'étendre le domaine d'existence du motif en oreilles de lapin ( $2 \lesssim Sh \lesssim 10$ ), assez restreint par ailleurs.

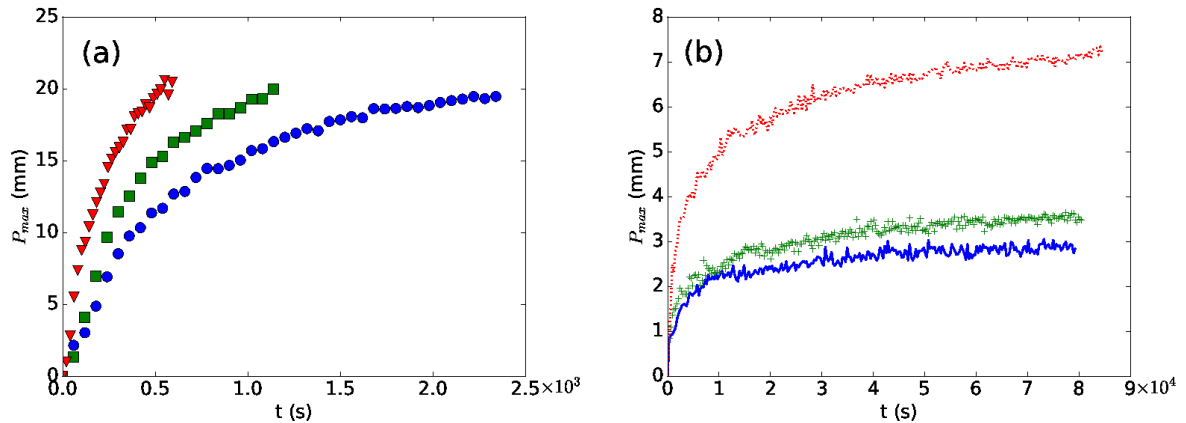
En utilisant les relevés précis de la topographie du lit  $\xi(x, y, t)$ , on peut extraire l'évolution temporelle de la profondeur maximale d'affouillement  $P_{\max}(t)$ . Les figures 4 (a) et 4 (b) montrent cette évolution pour les deux types de motifs respectivement : la fosse creusée par le Tourbillon en Fer à Cheval (TFC), et le motif en Oreilles de Lapin (OL). Dans le cas TFC,  $P_{\max}(t)$  évolue rapidement et semble tendre vers une valeur asymptotique  $P_{\infty}$  de l'ordre de la taille  $D$  du cylindre, conformément aux valeurs trouvées dans la littérature [1–3]. Il faut noter que les courbes de la figure 4 (a) sont tronquées, en se limitant aux points pour lesquels la fosse n'atteint pas les parois latérales du canal. Le motif OL évolue nettement plus lentement et atteint une valeur asymptotique  $P_{\infty}$  plus faible, jusqu'à 10 fois moindre que pour le motif TFC. Plus la vitesse d'écoulement est élevée, plus les fosses en oreilles de lapin sont profondes aux temps



**FIGURE 3.** Utilisation d'un sabot rigide en pied de cylindre (embase noire sur la photo) pour étendre le domaine d'existence des oreilles de lapin : (a) remplacement d'une partie du lit granulaire par un fond rigide ; (b) motif en oreilles de lapin observé à  $t \simeq 3,2 \times 10^3$  s. La vitesse d'écoulement est la même que pour la photo de la figure 1 (a) :  $Re_D \simeq 3,6 \times 10^3$  et  $Sh \simeq 8$ .

longs. La courbe correspondant à l'écoulement le plus rapide sur la figure 4 (b) a été obtenue en utilisant le sabot rigide.

Les relevés topographiques nous donnent aussi accès à la position  $(x_m, y_m)$  du maximum de profondeur. Pour les fosses TFC, passés les tous premiers instants (où l'ombre du cylindre perturbe les relevés), le point le plus profond se trouve au pied amont du cylindre  $(x_m, y_m) \simeq (-D/2, 0)$ , et ce quelle que soit la vitesse d'écoulement. Dans le cas OL, le maximum de profondeur reste dans la même zone pour chaque expérience. On remarque cependant qu'à hautes vitesses d'écoulement, cette zone est plus éloignée de l'axe longitudinal du canal :  $(x_m, y_m) \simeq (5D/2, \pm D/2)$  pour  $Sh \simeq 2,8$  contre  $(x_m, y_m) \simeq (5D/2, \pm D)$  pour  $Sh \simeq 4,4$ .



**FIGURE 4.** Évolution temporelle de la profondeur maximale d'affouillement  $P_{\max}(t)$ , pour les deux types de motif. (a) Pour le motif creusé par tourbillon en fer à cheval : (●)  $Re_D \simeq 2,8 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 5,1$  ; (■)  $Re_D \simeq 3,2 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 6,4$  ; (▼)  $Re_D \simeq 3,6 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 8,0$ . (b) Pour les oreilles de lapin : (—)  $Re_D \simeq 2,1 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 2,8$  ; (+)  $Re_D \simeq 2,3 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 3,3$  ; (···)  $Re_D \simeq 2,7 \times 10^3$ ,  $Sh \simeq 4,4$ .

## 4 Conclusion

À l'aide d'une approche expérimentale modèle, nous étudions l'érosion au voisinage d'un cylindre monté verticalement sur un lit granulaire, en condition *clear-water*. Outre la figure d'affouillement classique qui se forme rapidement sous l'effet du tourbillon en fer à cheval, nous observons un second motif d'érosion en formes d'« oreilles de lapin » à l'aval de l'obstacle, qui se forme plus lentement à des vitesses d'écoulement plus faibles, sous l'effet des tourbillons de sillage. L'ajout d'un sabot rigide permet de découpler l'effet des différents tourbillons et d'augmenter le domaine d'existence du motif en oreilles de lapin. L'utilisation des données issues des relevés topographiques, en faisant varier le diamètre et la hauteur du cylindre, ainsi que les grains, permettra de préciser les domaines d'existence des différents motifs. Des mesures PIV (*Particle Image Velocimetry*) sont en cours pour confirmer le lien entre la structure de l'écoulement et les figures d'érosion.

**Remerciements :** Ce travail est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche à travers le projet SSHEAR No. ANR-14-CE03-001. Nous sommes reconnaissants envers S. Chateau pour ses expériences préliminaires et envers E. Weisfred pour les discussions fructueuses que nous avons eues avec lui. Nous remercions J. Amarni, A. Aubertin, L. Auffray et R. Pidoux pour leurs contributions au développement du montage expérimental.

## Références

1. R. ETTEMA, G. CONSTANTINESCU & B. MELVILLE, Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions, *Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies* (2011).
2. C. MANES & M. BROCCINI, Local scour around structures and the phenomenology of turbulence, *J. Fluid Mech.*, **779**, 309–324 (2015).
3. A. ROULUND, B. M. SUMER, J. FREDSSØE & J. MICHELSEN, Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, **534**, 351–401 (2005).
4. C. H. K. WILLIAMSON, Vortex dynamics in the cylinder wake, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **28**, 477–539 (1995).
5. S. KUANG, C. LAMARCHE, J. CURTIS & A. YU, Discrete particle simulation of jet-induced cratering of a granular bed, *Powder Technol.*, **239**, 319–336 (2013).
6. J.-H. CHEN, W. G. PRITCHARD & S. J. TAVENER, Bifurcation for flow past a cylinder between parallel planes, *J. Fluid Mech.*, **284**, 23–41 (1995).
7. S. BADR, G. GAUTHIER & P. GONDRET, Crater jet morphology, *Phys. Fluids*, **28**, 033305 (2016).
8. T. LOISELEUX, P. GONDRET, M. RABAUD & D. DOPPLER, Onset of erosion and avalanche for an inclined granular bed sheared by a continuous laminar flow, *Phys. Fluids*, **17**, 103304 (2005).
9. A. AUZERAIS, A. JARNO, A. EZERSKY & F. MARIN, Formation of localized sand patterns downstream from a vertical cylinder under steady flows: Experimental and theoretical study, *Phys. Rev. E*, **94**, 052903 (2016).