

# Influence de la gravité sur le transport granulaire en écoulement turbulent

V. Laval<sup>a</sup>, F. Charru<sup>a</sup>

a. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse

## Résumé :

*Le transport granulaire, depuis les travaux précurseurs de Bagnold, a été un champ d'investigation largement étudié pour des applications en milieux naturels et industriels mais les lois de transport, la structuration et la formation d'un lit de sable, ainsi que les phénomènes de dunes isolées et de mise en suspension souffrent encore de lacunes quant à leurs modélisations. Cette étude expérimentale a été menée afin de déterminer l'influence potentielle de la gravité sur la mise en mouvement et le transport de grains par un écoulement. La première étape des mesures a consisté à déterminer expérimentalement un seuil de mise en mouvement du lit. Le deuxième point d'intérêt de cette campagne s'est porté sur les vitesses d'avance des dunes dans le cas de pentes ascendantes. Les points expérimentaux se regroupent sur une courbe suivant une loi de puissance en 2.5 fonction de l'écart au seuil.*

## Abstract :

*Since the pioneer work of Bagnold, the transport of sediment by fluid flows has been widely studied for its applications in natural environment and industrial processes. However, many phenomena still remain poorly understood. In particular, the effect of the pipe or channel slope has received little attention. An experimental study has been carried out to determine the potential influence of the slope on the motion rate of a sand bed under water flow. The first stage of the study has been focused on the determination of the critical conditions associated with the inception of motion. Secondly, the attention has been devoted to the velocity of the dunes formed this way on upward slopes. A power law function of the gap to threshold conditions with an exponent of approximately 2,5 can be found.*

**Mots clefs : Transport granulaire ; Pente ; Initiation du mouvement**

## 1 Introduction

Le transport granulaire a été un champ d'investigation largement exploré sous de nombreux aspects mais la majorité des études se place dans une configuration où les grains se déplacent sur un fond horizontal. Quelques travaux ont inclus une pente dans leurs dispositifs, amenant alors propositions et données expérimentales quant à l'influence de celle-ci sur le déplacement de grains soumis à un écoulement. On peut citer les travaux de Luque et Van Beek (1976) [4], ceux de Chiew et Parker (1994) [1] et ceux de Loiseleux et al (2005) [3] dans le cas laminaire. Il reste de nombreuses questions en ce qui concerne l'impact de ce nouveau paramètre, sur le seuil de mise en mouvement d'un grain, sur la vitesse de déplacement des structures à une échelle plus large, et sur la morphologie de ces mêmes structures. Une première étude sur ce sujet est ici présentée, à commencer par le dispositif expérimental conçu et construit dans ce but. Des résultats préliminaires sont ensuite exposés sur l'initiation du mouvement et sur la vitesse des dunes en écoulement turbulent. Puis les perspectives envisagées viennent conclure ce document.

## 2 Dispositif expérimental et Métrologie

L'optique de cette étude étant l'étude de l'influence de la pente sur la dynamique d'un lit de grains cisailé par un fluide, ici l'eau, un dispositif permettant des pentes ascendantes et descendantes a été conçu et fabriqué dans le laboratoire de l'IMFT, figure 1.

### 2.1 Dispositif expérimental

Celui-ci est constitué d'un canal fermé de section rectangulaire de hauteur 60mm, de largeur 120 mm et de longueur 6,20 m (1). Afin de s'affranchir d'un écoulement gravitaire, le canal est relié en circuit fermé à une pompe volumétrique (2), autorisant ainsi un contrôle précis du débit, vérifié en aval par un débitmètre électromagnétique (3). Un vase d'expansion (4) permet une mise en pression contrôlée et une purge efficace du système afin d'éviter la présence de bulles d'air dommageables à la mesure.

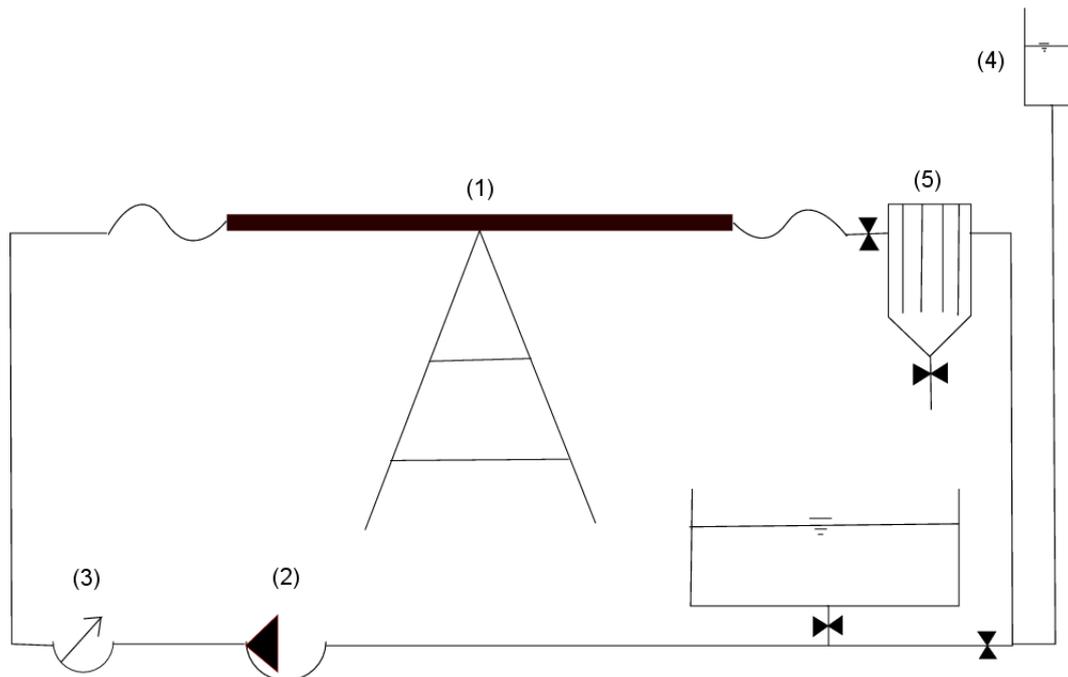


FIGURE 1 – Schéma de principe du dispositif expérimental

Le tri des grains en aval est assuré par un décanteur (5) permettant alors d'éviter la présence de grains dans le reste du circuit. La dernière partie du canal, d'une longueur de 1,50 m, est en verre alors que le reste est en plexiglas. Ceci permet d'avoir un indice optique optimal pour observer les structures sableuses dans la zone où l'écoulement est pleinement développé.

Une trappe située à 4,70 m de l'entrée du canal permet l'introduction d'un volume de grains constant de 60 mL une fois le canal rempli. Ce tas est ensuite ratissé jusqu'à l'obtention d'une nappe de sable d'épaisseur constante de 5 mm et de longueur égale à 150 mm occupant toute la largeur du canal. Une fois cette mise en place effectuée, le canal est purgé de ses bulles d'air par une légère inclinaison et une purge manuelle située à l'extrémité du canal. Le débit est ensuite établi jusqu'à mise en mouvement des grains. L'observation se fait visuellement et le débit seuil est retenu lorsque l'on observe le mouvement de quelques grains de manière continue sur une distance de l'ordre de quelques diamètres. L'évolution de la topographie est observée jusqu'à la sortie complète du volume de sable du champ de visualisation.

Dans cette étude expérimentale, des billes de verre translucides de diamètre médian 0,450 mm et de densité  $2600 \text{ kg/m}^3$  ont été utilisées. A partir de la détermination du débit seuil, les débits appliqués à chaque angle considéré ont été calculés en multipliant par 1,25, 1,5 et 1,75 les débits seuils. De cette manière, la comparaison entre les évolutions du lit pour chaque angle donné a été facilitée. La gamme d'angle balayée est  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $15^\circ$  en ne considérant que les pentes ascendantes.

## 2.2 Métrologie

Le dispositif de mesure utilisé dans le cadre de ces expériences est constitué d'un laser continu émettant dans le vert et d'une caméra Pixelfly inclinée d'un angle de  $17^\circ$  par rapport au fond du canal. La nappe laser est projetée sur le lit de sable parallèlement à l'écoulement au centre de la conduite sur une longueur de 20 cm. La caméra inclinée permet alors d'observer la déformation et l'avance de la nappe de sable en son centre en s'affranchissant des effets de masque tridimensionnels. On suppose donc ici que la topographie du lit de grains reste majoritairement bidimensionnelle.

## 3 Seuil de mise en mouvement et pente

Les mesures de débit seuil effectuées en fonction de l'angle d'inclinaison sont présentées sur la figure 2. N'y sont représentés que les angles positifs correspondant à des écoulements ascendants. Les mesures sur pentes négatives se sont avérées plus difficiles à mettre en place de par le roulement naturel des grains sur une paroi lisse. Les points de la figure 2 correspondent à nos mesures tandis que les traits pleins représentent la corrélation de Soulsby et Whitehouse [5] dans deux situations : dans le cas où le débit seuil à l'horizontal est calculé via leur corrélation et dans le cas où nous prenons le débit seuil que nous avons mesuré. Le nombre de Shields critique à l'horizontal de Soulsby et Whitehouse est calculé via la corrélation suivante :

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02D_*)] = 0.031 \quad (1)$$

où  $D_*$  est un diamètre de grain sans dimension donné par :

$$D_* = \left( \frac{Re_*^2}{\theta_{cr}} \right) = \left[ g \frac{s-1}{\nu^2} \right]^{1/3} d = 11.23 \quad (2)$$

De notre côté, nous n'avons accès qu'à la vitesse débitante correspondant au seuil du mouvement déterminé visuellement. A partir de celle-ci, nous estimons la vitesse de frottement sur une paroi lisse via la corrélation de Blasius :

$$c_f = 0.079(1.33Re)^{-1/4} = \frac{u_*^2}{1/2U_{moy}^2} \quad (3)$$

Nous corrigeons notre vitesse de frottement sur lit de sable par un facteur correctif issu de Charru et Franklin (2010) [2]  $u_{*d} = 1.2u_*$ . Nous pouvons ainsi comparer notre seuil de mise en mouvement avec les corrélations expérimentales considérant que  $\theta$  peut s'exprimer tel que :  $\theta = \frac{u_{*d}^2}{V_{ref}^2}$  où  $V_{ref}$  est une vitesse de référence de sédimentation. Nous obtenons alors dans notre cas un nombre de Shields critique inférieur à celui préconisé par Soulsby et Whitehouse [5],  $\theta_{cr} = 0.027$ . Pour attester de l'effet de la pente sur le seuil de mise en mouvement, nous utilisons une correction donnée par Soulsby and Whitehouse [5] :

$$\frac{\theta_{\beta cr}}{\theta_{cr}} = \frac{\sin(\phi + \beta)}{\sin(\phi)} \quad (4)$$

où  $\phi$  correspond à un angle de repos des grains et vaut  $\phi = 32^\circ$ .

La figure 2 montre le nombre de Shields critique en fonction de l'angle d'inclinaison ainsi que la correction due à l'angle (4). Nous obtenons un nombre de Shields critique à  $0^\circ$  légèrement inférieur à celui trouvé par Soulsby et Whitehouse [5] mais la tendance donnée par la correction due à l'angle est assez bonne. Il faut noter que la précision des mesures est liée à la subjectivité de l'expérimentateur. On considère alors ces résultats en accord avec cette correction, attestant ainsi de l'effet de la pente sur l'initiation du mouvement.

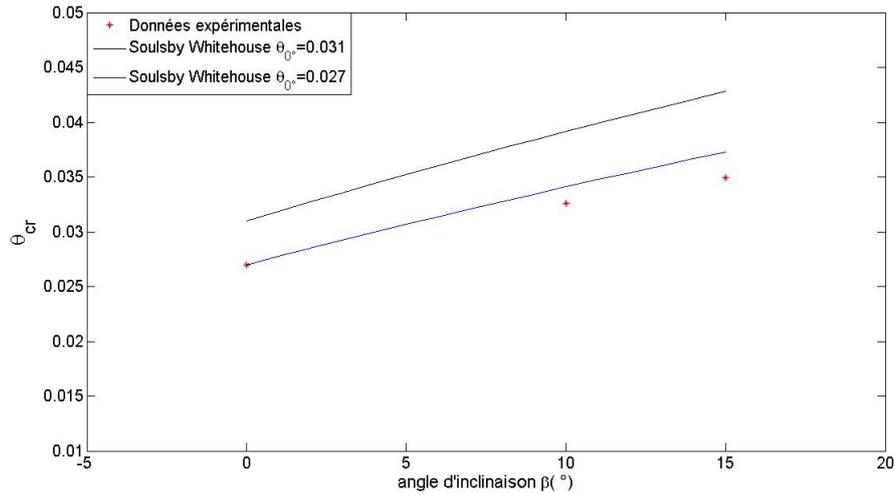


FIGURE 2 – Relation entre cisaillement critique et inclinaison

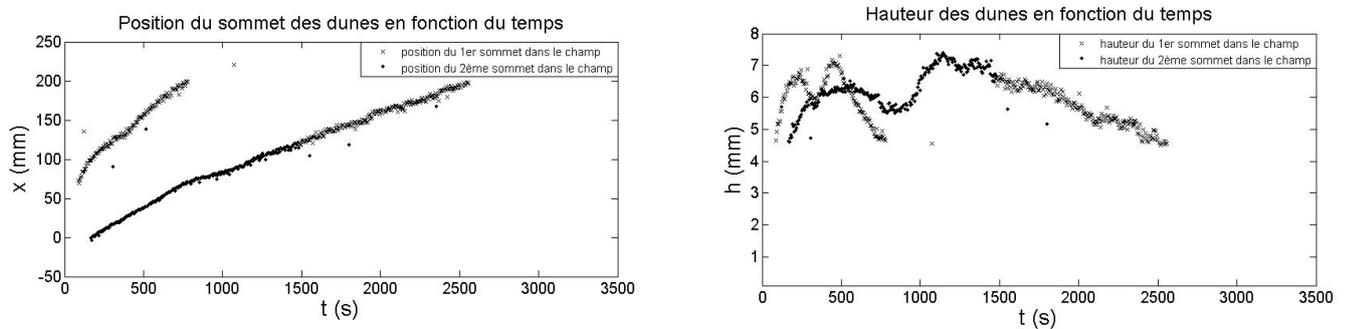


FIGURE 3 – Position et hauteur des deux dunes au cours du temps

#### 4 Vitesse d'avance des dunes

Ces expériences nous ont aussi permis d'étudier l'évolution de la morphologie d'un lit plat de longueur définie cisailé par un écoulement. Ce lit se déstabilise rapidement menant à la formation de deux dunes, l'une avançant plus vite que l'autre. Ceci provoque le fractionnement du lit de grains et la dégénérescence des dunes au cours du temps en dunes isolées de type barkhanes. Sur la figure 3, on peut observer la position des sommets des deux dunes au cours du temps 3a) et l'évolution de leurs hauteurs 3b). La figure 3a) nous montre effectivement que les deux dunes n'avancent pas à la même vitesse, la dune aval s'éloigne de la dune amont. En regardant la figure 3b), on constate que les hauteurs des dunes varient fortement au cours du temps, la dune aval étant plus petite, elle se déplace plus vite.

On peut affirmer que nous observons un phénomène majoritairement transitoire qui n'a pas atteint l'équilibre. L'évolution de la hauteur du maximum des dunes au cours du temps évolue tout d'abord de manière oscillatoire puis se stabilise vers une tendance à la décroissance, dans la logique de l'érosion. Nous observons en fait la formation puis une tendance vers la mise à l'équilibre des dunes, que ce soit pour leur perte de volume au cours du temps que pour l'établissement d'une longueur d'onde stable. Nous n'observons pas de motif se conservant dans le temps. Il est alors délicat de conjecturer sur des relations liant vitesses et caractéristiques géométriques au cours d'une seule et même expérience. De plus, on peut supposer que les parois latérales jouent ici un rôle non négligeable. En effet, on observe une déformation tridimensionnelle du lit de sable originel. La partie centrale avance bien plus vite que les côtés pouvant amener à la formation d'une pointe de sable au centre de la conduite, laissant les grains les plus proches de la paroi en retrait. Nous pouvons toutefois comparer les expériences les unes aux autres et étudier l'effet de l'écart au seuil sur les différentes vitesses caractéristiques, ainsi

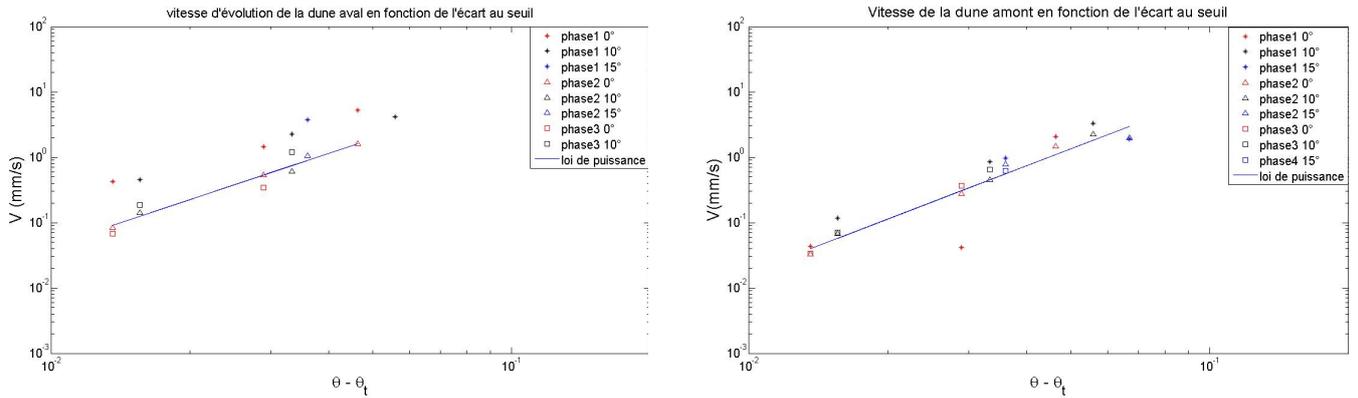


FIGURE 4 – Vitesse des dunes fonction de l'écart au seuil et lois de puissance

que l'effet de l'angle. Au-delà du fait qu'une augmentation du débit implique une augmentation de la vitesse des dunes, on peut se placer à écart au seuil constant et observer l'évolution de la vitesse.

Comme nous avons pu voir que les vitesses, et la dynamique de manière générale, de la dune aval et de la dune amont étaient différentes, nous les présentons distinctement sur la figure (4). De par le fait que l'on se place dans un régime de transition, nous avons décorrélé les vitesses d'avance d'une dune en ce que nous avons appelé des phases. Pour la dune 1 par exemple (dune aval), la phase 1 correspond à la phase de mise en forme des dunes. On constate que la vitesse durant cette phase est plus importante dû au fait qu'elle ne correspond pas à un déplacement global de la dune mais plutôt à l'accrétion sur le bord de la nappe de sable et à la formation de la face d'avalanche. Comme on peut le constater sur la courbe de position (fig 3), plusieurs pentes, et donc plusieurs vitesses peuvent être observées et c'est ce que nous avons tenté de mettre en perspective. On constate cependant que mis à part la phase de formation de la dune aval qui est seule dans le champ à ce moment là, les autres phases admettent des vitesses qui se regroupent globalement bien sur une droite. On retrouve ici une pente se rapprochant d'un exposant 2.5 sur l'écart au seuil, respectivement 2.34 pour la dune aval et 2,71 pour la dune amont. On retrouve donc bien une tendance se rapprochant de la loi énoncée dans Franklin et Charru (2011) [2] donnée par :

$$\frac{V_d}{V_{ref}} = 280 Re_s \frac{d}{L} (\theta - \theta_t)^{2.5} \quad (5)$$

où  $V_d$  est la vitesse de la dune,  $L$  la longueur de la dune et  $Re_s$  un nombre de Reynolds basé sur une vitesse de sédimentation. En ce qui concerne l'effet de la pente, on remarquera que peu importe l'angle, les points se rejoignent sur une courbe maîtresse, la vitesse des dunes évolue suivant une loi de puissance de l'écart au seuil. La seule différence est donc que le seuil se place plus haut. Cela sous-entend que la pente agit principalement sur le seuil de mise en mouvement. On peut rapprocher cela d'une augmentation de l'angle de repos qui agirait comme un frein sur la mise en mouvement. Mais une fois le seuil dépassé, la mise en mouvement suit la même loi qu'à l'horizontale. On peut reformuler cela en disant que l'excès de cisaillement par rapport au seuil nécessaire à l'obtention d'une vitesse de dune déterminée n'est pas dépendant de la pente de la conduite.

## 5 Perspectives et conclusions

En conclusion, les deux principaux résultats ici présentés sont que la correction du seuil de mise en mouvement dans le cas de conduites inclinées introduite par Soulsby et Whitehouse (1997) [5] rend bien compte de l'influence de la pente sur l'initiation du transport granulaire, et que dans le cas de conduites fermées la vitesse d'une dune n'est dépendante que de l'écart au seuil, c'est à dire du cisaillement effectivement ressenti. Cela amène alors au fait que le débit de grains n'est pas affecté réellement par la pente, les lois de puissance fonction de l'écart au seuil semblent bien reproduire la réalité. Il n'y a en fait qu'un décalage du seuil de mise en mouvement vers le haut, venant appuyer

alors l'idée d'une définition de l'initiation du mouvement à partir de l'équilibre local d'un grain. Cette étude préliminaire a permis de déblayer le terrain concernant l'effet de la pente sur le transport granulaire mais l'utilisation d'un lit de sable sur fond lisse a amené certaines difficultés expérimentales dont on essaiera de s'affranchir lors de la prochaine campagne de mesure. Celle-ci sera menée sur des dunes isolées de type barkhane afin d'étudier une structure dont la morphologie a déjà été étudiée et l'impact de la gravité sur celle-ci. Une rugosité équivalente sera apposée sur le fond du canal pour éviter les phénomènes de roulement et de glissement permettant ainsi de pousser l'étude sur des pentes descendantes. Pour finir, nous tenons à remercier TOTAL S.A pour le financement de cette opération de recherche.

## Références

- [1] Chiew, Y-M., Parker, G. 1994 Incipient sediment motion on non-horizontal slopes *J. Hydraul. Res.* **32** 649-660
- [2] Franklin, E.M., Charru, F. 2010 Subaqueous barchan dunes in turbulent shear flow. Part 1 : Dune motion *J. Fluid Mech.* **sous presse**
- [3] Loiseleux, T., Gondret, P., Rabaud, M., Doppler, D. 2005 Onset of erosion and avalanche for an inclined granular bed sheared by a continuous laminar flow *Phys. Fluids.* **17** 103304
- [4] Luque, R.F., Beek R. 1976 Erosion and transport of bedload sediment *J. Hydraul. Res.* **14(2)** 127-144
- [5] Soulsby, R.L., Whitehouse, R.J.S 1997 Threshold of sediment motion in coastal environments *Proceedings of Pacific Coasts and Ports Conference, Christchurch, New Zealand* **1** 149-154