

Migration de dunes dans une conduite fermée

Erick DE MORAES FRANKLIN & François CHARRU

*Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
Allée du Pr. Camille Soula, 31400, Toulouse
demoraes@imft.fr, charru@imft.fr*

Résumé :

Le transport de grains par un fluide en écoulement est fréquemment rencontré dans la nature et dans l'industrie. Lorsque la contrainte de cisaillement exercée par le fluide en écoulement sur un lit de grains reste modérée, les grains mobiles forment une couche qui se déplace toujours en contact avec le fond. Sur un sol non érodable, si le débit de grains transportés est assez faible, le lit n'est pas continu, mais constitué de dunes. On présente ici les résultats d'une étude expérimentale sur le déplacement et la déformation, par un écoulement d'eau, de dunes de billes de verre et de zirconium dans une conduite fermée de section rectangulaire. On vérifie que ses dimensions sont autosimilaires et que la vitesse des dunes varie avec l'inverse de leur taille et avec le débit de grains.

Abstract :

The transport of solid particles entrained by a fluid flow is frequently found in nature and in industrial environments. If shear stresses exerted by the fluid on the bed of particles are bounded to some limits, a mobile layer of particles takes place in which the particles stay in contact with the fixed bed. If it takes place over a non-erodible ground, and if the particles flow rate is small enough, an initial thin continuous layer of particles becomes discontinuous and composed of isolated dunes. We present here an experimental study concerning the displacement and deformation of isolated dunes (composed of glass or zirconium beads) submitted to a rectangular closed-conduit fluid flow. We observed auto-similarity in dunes dimensions and that their displacement velocity scales with the inverse of their dimensions and with grains flow rate.

Mots-clefs :

écoulement ; transport de particules ; dunes

1 Introduction

Le transport de grains entraînés par un fluide en écoulement est fréquemment rencontré dans la nature et dans l'industrie. On le rencontre, par exemple, dans l'érosion des berges de rivières, dans le déplacement de dunes dans les déserts, mais aussi dans l'extraction de pétrole et dans l'industrie agro-alimentaire. Une meilleure connaissance de ce transport est donc nécessaire pour la compréhension des certains phénomènes naturels ainsi comme pour la maîtrise des procédés mettant en oeuvre des grains.

Lorsque la contrainte de cisaillement exercée par le fluide sur le lit de grains est suffisamment grande pour en déplacer quelques-uns, mais reste modérée par rapport au poids des grains, l'écoulement du fluide en entraîne un certain nombre, néanmoins il n'est pas capable de les mettre en suspension. Les grains mobiles forment donc une couche qui se déplace toujours en contact avec le fond, ce mode de transport étant connu sous le nom de charriage.

Le transport de grains par charriage dépend d'un bilan entre deux forces :

a) une force motrice, ici d'origine hydrodynamique, liée aux contraintes exercées par le fluide sur les grains, d'ordre τd^2 , où τ est la contrainte au niveau des grains causée par l'écoulement et d le diamètre des grains ;

b) une force de résistance, ici liée à la pesanteur, d'ordre $(\rho_s - \rho)gd^3$, où ρ est la densité du fluide, ρ_s est la densité des grains et g l'accélération de la gravité ;

Le charriage a lieu si la force motrice est plus importante que la force de résistance. On peut regrouper tous ces paramètres dans le nombre de Shields, rapport entre les forces hydrodynamiques et la pesanteur, pour lequel on sait que le charriage a lieu dans la gamme $0,01 < \theta < 1$:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (1)$$

Sous l'action d'un écoulement perturbé, la couche de grains mobiles peut se déstabiliser et se déformer, donnant naissance à des dunes. Si le sol est non-érodable, comme la paroi d'une conduite, et si la quantité de grains est assez petite, le lit de grains, une fois déformé, n'est pas continu, mais constitué de dunes isolées les unes des autres. L'étude expérimentale présentée ici concerne cette dernière situation.

2 Montage Expérimental

En ce qui concerne l'écoulement du fluide, nous nous sommes intéressés au régime turbulent, qui peut être défini en termes du nombre de Reynolds basé sur la vitesse moyenne (sur la section transversale) du fluide \bar{U} et sur la hauteur du canal H : $Re = \frac{\bar{U}H}{\nu} > 10000$, où ν est la viscosité cinématique du fluide. Dans ce cas, $\tau = \rho u_*^2$, où u_* est la vitesse de frottement de l'écoulement.

Dans nos expériences, nous avons utilisé l'eau comme fluide et différents milieux granulaires : des billes de verre ($\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$) de $d = 0,5 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$ et $0,12 \text{ mm}$ et des billes de zirconium ($\rho_s = 3800 \text{ kg/m}^3$) de $d = 0,19 \text{ mm}$. Le débit d'eau a été varié entre $6 \text{ m}^3/\text{h}$ et $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Ainsi, les gammes de θ et de Re explorées sont : $0,02 < \theta < 0,41$ et $13000 < Re < 24000$.

Afin de contrôler au mieux la déformation et le déplacement de dunes sous un écoulement permanent d'eau, il est souhaitable d'avoir un écoulement présentant un niveau de turbulence le plus faible possible à l'entrée du canal. Nous avons choisi un écoulement gravitationnel, évitant ainsi des fluctuations de vitesse liées à l'utilisation d'une pompe. Pour cela, nous avons utilisé un réservoir d'eau à niveau constant, en charge par rapport à la sortie de la section de test.

Le dispositif expérimental est constitué d'un réservoir principal (en charge de 2 m par rapport à la section de test), d'un divergent / nid d'abeille / convergent (pour casser les grosses structures turbulentes), du canal proprement dit, d'un séparateur de grains, d'un réservoir secondaire (décharge) et d'une pompe pour remonter l'eau vers le réservoir principal. L'eau y circule en boucle suivant cet ordre.

Le canal est horizontal et de section transversale rectangulaire, avec 120 mm de largeur par 60 mm de hauteur et une longueur totale de 6 m , fait en matériau transparent. Une des avantages de la section rectangulaire est d'avoir la paroi inférieure dans le plan horizontal, ce qui évite le contact permanent entre les grains et les parois (comme, par exemple, dans un tube de section circulaire), mais aussi facilite la visualisation des dunes. L'écoulement d'eau dans ce genre de conduite est bien connu (Melling *et al.* (1976)).

Les images de dessus et de côté de la dune ont été obtenues avec une seule caméra, grâce à un miroir à 45° . Une règle a été fixée à la conduite de sorte que, la caméra étant mobile, on a pu suivre chaque dune et obtenir sa vitesse de déplacement et sa déformation au long du temps. Le débit d'eau a été mesuré avec un débitmètre électromagnétique.

3 Résultats

La procédure expérimentale retenue a été : 1) le positionnement d'un tas de billes dans la conduite préalablement remplie avec de l'eau ; 2) l'établissement d'un débit d'eau constant ; 3) l'enregistrement des images.

Établi l'écoulement d'eau, les grains à la surface du tas se déplacent alors par charriage, tandis que ceux qui sont à l'intérieur du tas restent en repos. Avant de se déplacer d'une distance mesurable, le tas, initialement conique, se déforme considérablement et prend une forme de croissant (la figure 1 présente une vue schématique du dessus de la dune), semblable aux dunes du type barkhane observées dans les déserts à une échelle beaucoup plus grande (Hersen *et al.* (2002) et Elbelrhiti *et al.* (2005)). Dans nos expériences, les dunes avaient une longueur de l'ordre de quelques dizaines de millimètres, tandis que les dunes éoliennes ont une longueur de quelques dizaines de mètres.

Une fois la dune formée, la même dynamique rapportée pour les dunes éoliennes (Kroy *et al.*, 2002) et sous-marines se reproduit ici : l'érosion de grains en amont de la crête ; la migration des grains érodés vers la crête ; leur déposition à la crête ; des avalanches qui ont lieu sur la face aval ; l'entraînement vers l'aval de grains situés aux cornes.

Donc, une fois la forme de barkhane obtenue, la dune continue à se déplacer par un mécanisme d'érosion en amont et de déposition en aval, toujours en gardant cette forme. Néanmoins, comme il n'y a pas ici un débit imposé de grains en amont de la dune, celle-ci ne fait que perdre des grains par les cornes, diminuant de taille au fur et à mesure de son déplacement.

3.1 Morphologie

La figure 1 présente la relation entre longueur et largeur de dunes obtenues dans la conduite fermée, toutes les données y sont confondues. Dans cette figure, les vitesses de frottement, obtenues comme décrit ci-dessous, concernent le frottement par rapport aux parois horizontales. La longueur L correspond à la distance, dans le plan de symétrie, entre l'arrière de la dune (en amont) et le front de la dune (en aval), ne prenant donc pas en compte les cornes (figure 1).

Comme rapporté pour les dunes éoliennes et aquatiques dans une configuration différente de celle d'une conduite fermée (Hersen *et al.*, 2002), les formes des dunes obtenues ici sont autosimilaires, c'est-à-dire, il y a une relation linéaire entre longueur, largeur et hauteur. Outre l'autosimilarité des barkhanes, nous avons remarqué l'existence d'une taille minimale de ce type de dune : au dessous de cette taille, la dune s'étale. Néanmoins, nous ne présentons pas ici ces résultats.

3.2 Vitesse de Frottement u_*

Le profil de vitesses dans une conduite fermée horizontale de section rectangulaire a été mesuré par Melling *et al.* (1976) pour un écoulement monophasique. Dans le plan vertical de symétrie (dans le sens de l'écoulement), deux profils logarithmiques se raccordent à la mi-hauteur du canal. En s'écartant de ce plan de symétrie, vers les parois verticales (suivant la largeur du canal), le profil vertical varie, mais maintient la même allure, jusqu'à une distance de $0,05W_p$ de la paroi (W_p est la largeur du canal).

Dans nos expériences, les dunes occupaient la partie centrale du canal. On peut considérer cette région comme limitée à $0,35W_p$ environ de chaque côté du plan de symétrie dans le sens de l'écoulement, ce qui correspond à la région occupée par les dunes dans 99 % des mesures.

Sur la base de ces informations, on considère que u_* dans le plan vertical de symétrie est

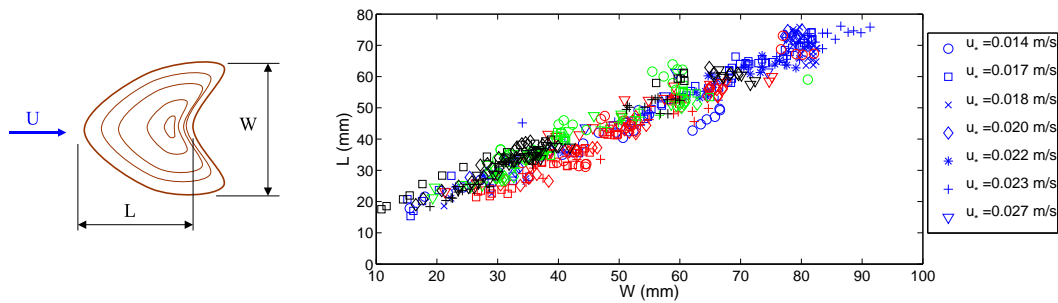


FIG. 1 – Longueur de dunes L en fonction de sa largeur W , toutes les données confondues. Le bleu, le rouge et le vert correspondent respectivement aux dunes formées de billes de verre de $d = 0,50\text{ mm}$, de $d = 0,20\text{ mm}$ et de $d = 0,12\text{ mm}$. Le noir correspond à celles de billes de zirconium de $d = 0,19\text{ mm}$.

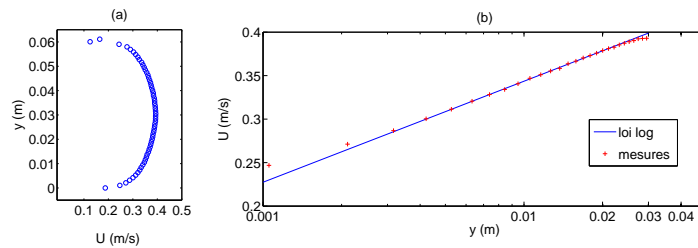


FIG. 2 – Profil vertical de la vitesse moyenne dans le plan de symétrie, mesuré par PIV. (a) : profil vertical de la vitesse moyenne U . (b) : demi-profil inférieur de la vitesse moyenne, avec y en échelle logarithmique. Le trait continu correspond à un ajuste logarithmique.

caractéristique du frottement sur les parois horizontales. Ainsi, on a mesuré par PIV (Particle Image Velocimetry) u_* dans ce plan (écoulement monophasique d'eau). La figure 2a montre un exemple de profil vertical de vitesses moyennes (temporelle) mesuré dans le plan de symétrie. On remarque la symétrie parfaite du profil. La figure 2b présente la moitié inférieure du profil vertical avec y (direction verticale) en échelle logarithmique. On voit bien que le demi-profil suit une loi logarithmique, avec une région de raccordement à la mi-hauteur du canal (y autour de $0,03\text{ m}$) et une région "interne" proche de la paroi. Les valeurs de u_* utilisées ici correspondent donc au frottement de l'écoulement sur les parois horizontales.

3.3 Vitesse de Déplacement

La figure 3a présente, en échelle logarithmique, les vitesses de déplacement V de dunes par rapport à leur longueurs L , pour les billes de verre de $0,12\text{ mm}$ de diamètre. Les longueurs des dunes varient entre 20 et 60 mm . La vitesse de frottement u_* dans la conduite varie entre $0,014$ et $0,027\text{ m/s}$ (débit d'eau varie entre 6 et $10\text{ m}^3/h$) ce qui correspond à une variation de θ entre $0,10$ et $0,41$.

On observe, pour chaque symbole, de groupes (paquets) de données. De façon générale, chaque paquet correspond à un ou deux essais différents : une dune isolée, formée à partir d'un tas initial différent, qui a été suivie.

On peut remarquer que, pour θ fixé, les points, ainsi comme les paquets, sont bien alignés. Cet alignement des paquets nous donne une bonne indication de la répétitivité des essais. L'alignement des données nous indique aussi une dépendance de V par rapport à L selon une loi de

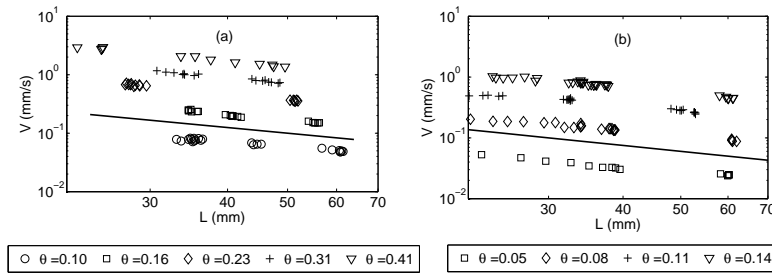


FIG. 3 – Vitesse de déplacement de dunes V en fonction de leur longueur L . (a) Dunes formées de billes de verre de $d = 0,12 \text{ mm}$. (b) Dunes formées de billes de zirconium de $d = 0,19 \text{ mm}$.

puissance. L'inclinaison de ces lignes étant égale à L^{-1} (ligne en trait continu sur la figure 3a), la vitesse de déplacement des dunes est proportionnelle à l'inverse de leur taille. Une relation semblable est vérifiée pour les dunes éoliennes (Elbelrhiti *et al.* (2005) et Kroy *et al.* (2002)).

La figure 3b correspond à des dunes composées de billes de zirconium de $0,19 \text{ mm}$ de diamètre. u_* a été varié entre $0,017$ et $0,027 \text{ m/s}$ (débit d'eau entre 7 et $10 \text{ m}^3/\text{h}$ et θ entre $0,05$ et $0,14$). On retrouve que V est proportionnelle à L^{-1} .

Outre la dépendance en L^{-1} , la figure 3 montre une forte variation de V avec θ : pour un même type de grain, multipliant θ par 4, ce qui correspond à une augmentation de 67% du débit d'eau (u_* multipliée par 2), la vitesse de déplacement des dunes varie sur 2 ordres de grandeur.

La figure 4a présente, pour une dune de longueur $L = 40 \text{ mm}$, la vitesse de déplacement de dunes V en fonction de u_* . Afin d'obtenir, pour chaque débit utilisé, les valeurs de V correspondant à des dunes avec une même longueur L , il nous a fallu ajuster les points expérimentaux. Ainsi, pour chaque grain et chaque débit, une courbe $V = cL^{-1}$ a été trouvée (correspondant aux droites de la figure 3), où c est une constante et où, pour la figure 4, $L = 40 \text{ mm}$.

On remarque que les points sont bien alignés selon des droites. Le graphique étant en échelle logarithmique, cet alignement signifie un comportement en loi de puissance : $V = u_*^a$, où a est un exposant (montré sur la figure 4). La dispersion des exposants trouvés nous indique qu'on se trouve près du seuil de mise en mouvement de grains et que la vitesse de frottement seuil de mise en mouvement doit être considérée.

La figure 4b présente, pour une dune de longueur $L = 40 \text{ mm}$, la vitesse de déplacement de dunes V en fonction de $u_* - u_{th}$, écart de la vitesse de frottement de l'écoulement u_* par rapport à la vitesse de frottement seuil de mise en mouvement de grains u_{th} . u_{th} est considérée ici comme correspondant à $\theta = 0.03$.

On remarque que les points sont bien alignés et que maintenant l'inclinaison des droites est la même. Ceci nous donne une indication de la qualité des données expérimentales et de la répétitivité des essais. La valeur trouvée pour a est la même dans tous les cas : $a = 3$.

Ces résultats corroborent les lois d'échelle de Bagnold (1941) : $V = \frac{Q}{L}$, où Q est le débit de grains mobiles. Q faisant échelle avec $(u_* - u_{th})^3$, V doit elle aussi faire échelle avec $(u_* - u_{th})^3$. La présence de u_{th} est très importante ici puisqu'on est près du seuil de mise en mouvement des grains. Ceci explique la forte variation de V avec u_* vérifiée sur les figures 3 et 4a.

4 Conclusions

Une étude expérimentale a été réalisée sur le déplacement et la déformation, par un écoulement d'eau, de dunes dans une conduite fermée horizontale de section rectangulaire. Les dunes sont composées de billes de différents matériaux (diamètre et densité), sous diverses vitesses

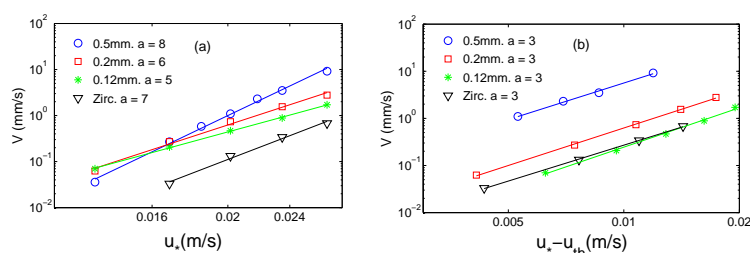


FIG. 4 – Vitesse de déplacement de dunes V en fonction de la vitesse de frottement u_* (a) et de l'écart de la vitesse de frottement u_* par rapport à la vitesse de frottement seuil u_{th} (b), pour une longueur de dune fixée $L = 40 \text{ mm}$. Les cercles, les carrés et les astérisques correspondent respectivement aux dunes formées de billes de verre de $d = 0,50 \text{ mm}$, de $d = 0,20 \text{ mm}$ et de $d = 0,12 \text{ mm}$. Les triangles correspondent à celles de billes de zirconium de $d = 0,19 \text{ mm}$.

d'écoulement d'eau. Un tas de billes déposé initialement sur le fond de la conduite se déforme rapidement pour former une dune en forme de croissant, semblable aux barchanes observées dans les déserts à une échelle beaucoup plus grande (Hersen *et al.* (2002) et Elbelrhiti *et al.* (2005)). Le mécanisme de transport des grains étant différent dans l'air et dans l'eau, le fait de trouver une forme de dune similaire montre que cette forme ne dépend pas du mécanisme de transport.

Les données obtenues concernent la morphologie et la vitesse de déplacement de ces dunes. Pour ce qui est de la morphologie, on a vérifié que les dimensions des dunes sont autosimilaires, comme rapporté pour des dunes éoliennes et aquatiques dans une configuration différente de celle d'une conduite fermée (Hersen *et al.*, 2002). Quant à la vitesse de dunes, il a été observé qu'elle varie avec l'inverse de leur taille, comme pour les dunes éoliennes (Elbelrhiti *et al.* (2005) et Kroy *et al.* (2002)) et avec $(u_* - u_{th})^3$.

Remerciements

Erick de Moraes Franklin remercie le gouvernement du Brésil et le fondation Capes pour le financement de sa bourse de doctorat.

Références

- Bagnold, R.A. 1941 The physics of blown sand and desert dunes. Chapman and Hall, Londres.
- Elbelrhiti, H., Claudin, P., Andreotti, B. 2005 Field evidence for surface-wave-induced instability of sand dunes. *Nature* **437** 720-723
- Hersen, P., Douady, S., Andreotti, B. 2002 Relevant length scale of barchan dunes. *Phys. Rev. Letters* **89** (26) 264301
- Melling, A., Whitelaw, J.H. 1976 Turbulent flow in a rectangular duct. *J. Fluid Mech.* **778** 289-315
- Kroy, K., Sauermann, G., Herrmann, H.J. 2002 Minimal model for aeolian sand dunes. *Phys. Rev. E* **66** 031302