

# Variations de pression dans un écoulement granulaire dense intermittent

Yann Bertho\*

Laboratoire FAST (UMR 7608), Bâtiment 502, Campus Paris-Sud, 91405 Orsay.

Quand des grains s'écoulent à faible débit dans un tube vertical, un régime intermittent est parfois observé : périodiquement, la colonne de grains s'écoule, puis s'immobilise spontanément avant de redémarrer à nouveau... Des ondes de compacité se propagent alors dans le milieu granulaire et sont associées à de fortes variations de la pression d'air.

Les matériaux granulaires sont utilisés quotidiennement dans un grand nombre d'industries à travers le monde. Depuis les secteurs agro-alimentaires (céréales), pharmaceutiques ou cosmétiques (comprimés, poudres), jusqu'aux secteurs du bâtiment (sable, graviers), nous sommes tous amenés à manipuler ou à consommer des matériaux granulaires. Leur transport, notamment, révèle des difficultés insoupçonnées et met en jeu des phénomènes physiques complexes encore mal compris ; on fait aussi bien appel au *transport pneumatique*, où les grains sont entraînés par injection d'air dans des conduites, qu'à des *écoulements gravitaires* de grains, sous l'effet de leur poids. Dans de telles installations, des dynamiques d'écoulement très riches sont observées [1]. Ces écoulements peuvent fluctuer ou encore présenter des intermittences ou même des blocages. Ces irrégularités s'accompagnent souvent de fortes variations de pression, en particulier au moment de l'arrêt et du redémarrage de l'écoulement. Celles-ci peuvent avoir des conséquences destructrices, telles que des explosions de silos ou de canalisations.

Afin de reproduire et comprendre ces phénomènes, des expériences ont été réalisées sur un montage de petite taille, mais équipé de nombreux capteurs de mesure permettant une caractérisation complète de l'écoulement.

## Corrélation pression-compacité

Les expériences sont réalisées dans un tube de verre vertical (diamètre 3 mm) dans lequel s'écoulent des microbilles de verre de diamètre 200  $\mu\text{m}$ , provenant d'un réservoir en haut du tube (figure 1).

Un robinet situé à l'extrémité inférieure du tube permet de régler le débit de grains et de déterminer leur régime d'écoulement. Quand il est presque fermé, le tube se remplit d'un empilement de grains qui s'écoulent lentement (un peu comme les voitures s'accumulent en amont d'un accident sur une autoroute). La compacité  $c$  de cet écoulement (rapport entre le volume de billes et le volume total) est élevée ( $c \sim 62\%$ ) et proche de celle d'un empilement immobile.

L'écoulement alors observé est parfois

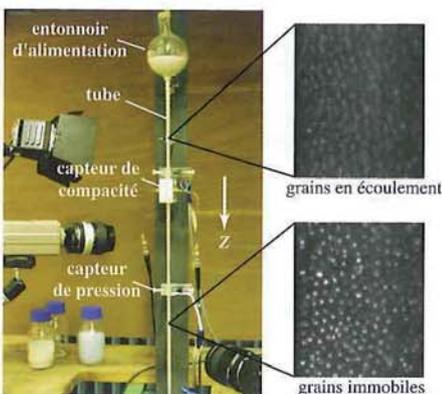


Figure 1 : Dispositif expérimental. À droite, visualisation de l'empilement de grains au moyen d'une caméra rapide ; certaines zones du tube peuvent être en écoulement alors que d'autres sont encore immobiles.

intermittent, les gradients de pression générés au niveau de la constriction inférieure étant suffisants pour arrêter l'écoulement. Les grains tombent alors à l'intérieur du tube, puis s'immobilisent spontanément avant de redémarrer à nouveau, et ceci avec une période bien définie. Le phénomène est trop rapide pour être analysé à l'œil ou même avec une caméra vidéo ordinaire : on utilise alors soit une caméra rapide, soit une caméra linéaire qui peut enregistrer l'image des grains uniquement sur une ligne verticale suivant l'axe du tube mais ce, plusieurs milliers de fois par seconde. En juxtaposant les lignes obtenues à des instants successifs, on obtient un diagramme spatio-temporel où l'axe horizontal correspond au temps et l'axe vertical à la position le long du tube (figure 2). Un grain immobile sur la ligne de visée apparaît alors sur le diagramme spatio-temporel comme un segment horizontal (tant qu'il reste sur la ligne de visée de la caméra !). On arrive ainsi à suivre, sur la figure 2, le déplacement d'un grain de couleur claire.

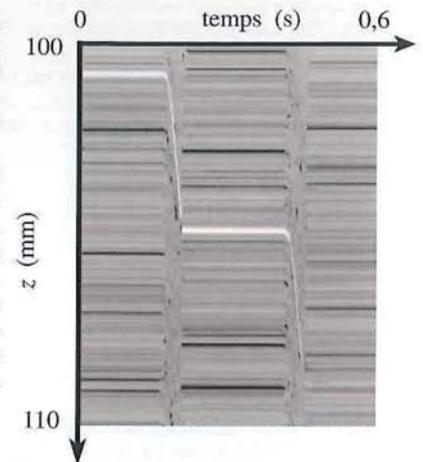


Figure 2 : Diagramme spatio-temporel mettant en évidence le caractère saccadé de l'écoulement de grains. La hauteur de tube représentée dans ce diagramme est de 10 mm.

Des capteurs permettant de mesurer simultanément les variations de pression dans le tube et la compacité des grains sont disposés le long du tube. Lors du redémarrage de l'écoulement (ligne pointillée sur la figure 3), la compacité des grains diminue légèrement (de 1 à 2%), conformément au principe

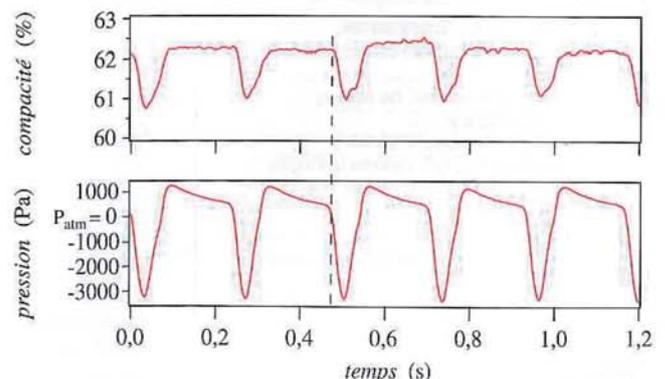


Figure 3 : Enregistrements simultanés des variations de compacité et de pression à une altitude donnée dans le tube. La ligne pointillée marque le démarrage de l'écoulement.

\* Adresse actuelle de l'auteur : Group for Research and Applications in Statistical Physics (GRASP), Université de Liège, 4000 Liège (Belgique). Mèl : Yann.Bertho@ulg.ac.be. Ce travail a été effectué dans le cadre d'une thèse dirigée par F. Giorgiutti-Dauphiné et J.P. Hulin.

de dilatance de Reynolds (voir l'encadré ci-dessous). Cette décompaction augmente le volume occupé par l'air entre les grains et crée ainsi une dépression à l'intérieur du tube. Pendant la phase d'écoulement des grains, cette dépression devient de plus en plus forte jusqu'à ce que les billes s'immobilisent en bas du tube : la colonne granulaire se recompacte alors et la pression réaugmente, car le volume entre grains se réduit. L'air diffuse alors par perméation à travers l'empilement poreux et la pression diminue donc jusqu'au redémarrage de l'écoulement.

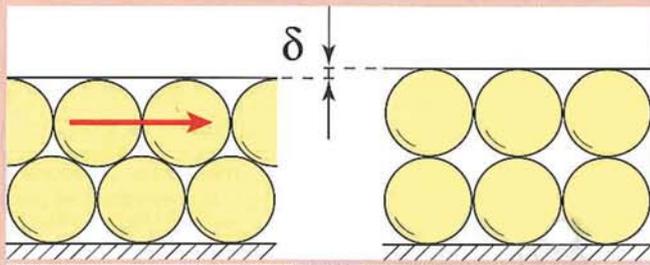
Ainsi, dans ces écoulements granulaires denses, la pression  $p$  de l'air est régie par une loi de la forme [2] :

$$\partial p / \partial t = 1/\chi \partial c / \partial t + D \partial^2 p / \partial t^2$$

où  $\chi$  est la compressibilité de l'air et  $D$  le coefficient de diffusion de la pression. Les variations de pression proviennent donc de deux contributions essentielles : le premier terme de l'équation reflète les variations rapides de compacité du milieu granulaire (i.e. variations de volume), alors que le second terme traduit, quant à lui, la diffusion lente de l'air entre les grains.

### Principe de dilatance de Reynolds

Pour se mouvoir, un milieu granulaire initialement au repos doit tout d'abord se décompacter : les billes doivent sortir des « puits de potentiel » dans lesquels elles se sont piégées. C'est le principe de dilatance de Reynolds. Ce phénomène explique l'assèchement du sable autour des pieds lorsque l'on marche sur le sable mouillé d'une plage. La déformation produite par le pied provoque la dilatation du milieu granulaire : l'eau s'infiltré alors dans les pores nouvellement créés, ce qui assèche le sable autour du pied.



Principe du phénomène de dilatance : le cisaillement relatif des deux couches de billes (flèche rouge sur l'image de gauche) provoque une augmentation  $\delta$  de l'épaisseur totale des couches (image de droite).

Le tracé des variations temporelles de la pression d'air en fonction de celles de la compacité du milieu granulaire (figure 4) reflète les prédictions de cette équation : lorsque les grains sont en mouvement – lors du démarrage [région (2)] et lors de l'arrêt [région (3)] de l'écoulement – pression et compacité varient linéairement ; les variations de pression liées au terme de diffusion sont alors négligeables. Lorsque la colonne granulaire est immobile [région (1)], la compacité demeure constante\* et la pression de l'air diffuse à travers l'empilement granulaire poreux.

Ainsi, pour un milieu granulaire peu perméable ( $D \ll 1$ ), en d'autres termes constitué de petites billes, les fluctuations de pression seraient directement proportionnelles aux variations de compacité du matériau, une compaction du milieu granulaire induisant localement une surpression et une décompaction engendrant une dépression. Cette variation est représentée par la ligne pointillée dans la figure 4, qui est effectivement voisine des variations obtenues expérimentalement. Une mesure de la pression se révèle donc être un indicateur parti-

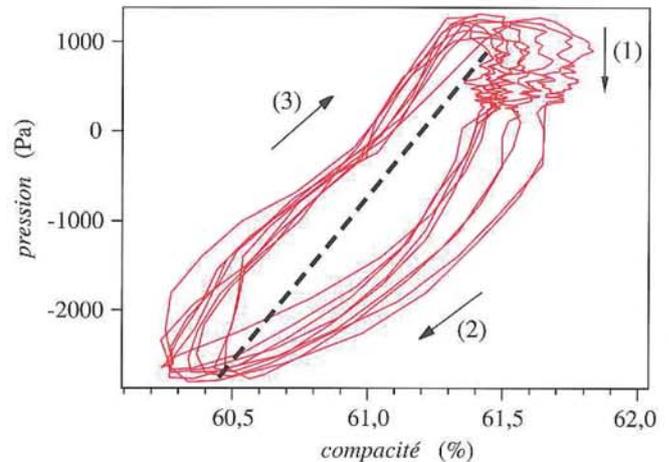


Figure 4 : Variations de pression en fonction de la compacité durant 10 cycles du régime compact intermittent. Les flèches indiquent la direction des variations pour chaque partie des courbes. La phase (1) correspond aux lentes relaxations de pression à travers l'empilement granulaire immobile ; les phases (2) et (3) correspondent respectivement au démarrage et à l'arrêt des billes. La ligne pointillée a la pente théorique  $1/\chi$ .

culièrement sensible de petites fluctuations de compacité dans ce type d'écoulement dense. À l'inverse, pour un empilement de grains très perméable ( $D \gg 1$ ), les moindres variations de pression créées lors de l'écoulement diffuseront très rapidement, empêchant, de fait, l'établissement de dépressions importantes dans le milieu granulaire.

### Propagation d'ondes de compacité et amplification des fluctuations de pression.

Tout comme la figure 2, la figure 5 représente un diagramme spatio-temporel de l'écoulement de grains durant une période de cet écoulement granulaire intermittent. Ici, l'image a été traitée de façon à faire ressortir les phases où les grains sont à l'arrêt (zones claires) et les phases d'écoulement (zone sombre). Les frontières du domaine spatio-temporel correspondant à la zone d'écoulement sont alors bien définies et traduisent les phases de démarrage et d'arrêt de l'écoulement. Ainsi, nous constatons que l'écoulement démarre plutôt dans le bas du tube que dans le haut de celui-ci : une onde de décompaction se propage donc vers le haut à la vitesse  $v_d$ . Le blocage de l'écoulement se propage également de bas en haut, avec une vitesse  $v_c$  nettement plus grande que  $v_d$ . Les

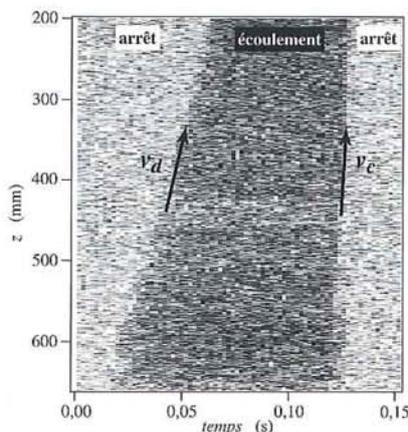


Figure 5 : Diagramme spatio-temporel réalisé sur une période du régime compact intermittent et une hauteur de 500 mm, et traité de façon à mettre en évidence la région où les billes sont en écoulement (région sombre) et celles où elles sont statiques (régions claires). Des ondes de décompaction et de compaction se propagent dans le milieu granulaire.

pentés des frontières du domaine ainsi délimité reflètent les vitesses de propagation des ondes de décompaction et de recompaction qui évoluent vers le haut du tube.

Ce diagramme spatio-temporel indique que la fraction du temps durant laquelle les grains sont en mouvement est plus importante dans le bas du tube que dans le haut. Comme tous les grains se déplacent de la même distance pendant une période (conservation du débit oblige !), leur

\* En toute rigueur, on observe de petites fluctuations de compacité, certainement dues à des réarrangements locaux provoqués par la diffusion de l'air à travers l'empilement de grains.

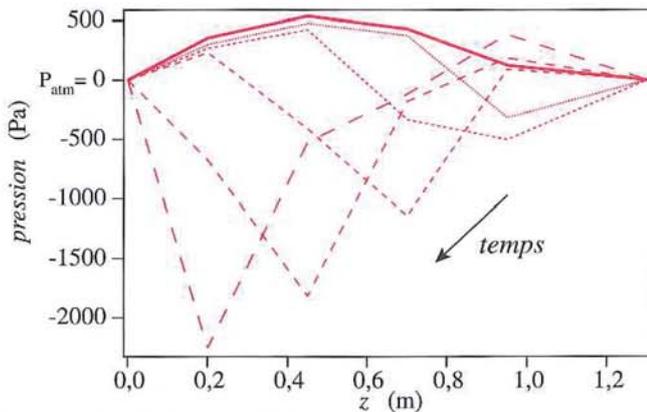


Figure 6 : Évolution du profil de pression dans le tube au cours du temps ; chaque courbe correspond au profil de pression à un instant donné. La courbe en trait plein correspond au moment où la colonne de billes est arrêtée. La côte  $z = 0$  correspond au haut du tube.

vitesse au moment de l'écoulement est beaucoup plus forte en haut du tube qu'en bas. Les vitesses de chute des grains varient ainsi de 10 à 40 cm/s.

À la propagation de ces ondes de compacité dans le milieu granulaire sont associées de fortes variations de pression. Au fur et à mesure que le front de démarrage de l'écoulement se

déplace vers le haut du tube à la vitesse  $v_d$  (figure 5), les variations de pression résultantes se propagent également vers le haut : une dépression, apparue initialement en bas de la colonne lors de la mise en mouvement des grains, se propage vers le haut en s'amplifiant fortement (figure 6). Des variations de pression importantes sont ainsi générées dans la conduite. Après l'arrêt des grains, la pression se rééquilibre ensuite lentement par diffusion de l'air à travers l'empilement immobile, jusqu'à ce qu'on revienne au profil de pression initial (trait plein sur la figure 6).

On a vu que des variations de pression déjà importantes (de l'ordre de 4000 Pa) sont observées sur la faible longueur (1,30 m) du dispositif modèle décrit ci-dessus. On peut donc s'attendre à des valeurs beaucoup plus importantes sur des dispositifs industriels dont la hauteur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et dont le diamètre est plus élevé. Des contraintes dangereuses pourraient en résulter et mener à des ruptures catastrophiques.

### Références

- [1] Y. Bertho, F. Giorgiutti-Dauphiné, T. Raafat, E.J. Hinch, H.J. Herrmann, J.P. Hulin, "Powder flow down a vertical pipe: the effect of air flow", *J. Fluid Mech.* **459** (2002), 317-345
- [2] Y. Bertho, F. Giorgiutti-Dauphiné and J.-P. Hulin, "Intermittent dry granular flow in a vertical pipe", *Phys. Fluids* **15** (2003), 3358-3369