

# Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires géophysiques

S. Viroulet<sup>1</sup>, J. L. Baker<sup>2</sup>, A. N. Edwards<sup>3</sup> and J. M. N. T. Gray<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 31400 Toulouse, France

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australia

<sup>3</sup> School of Mathematics and Manchester Centre for Nonlinear Dynamics, The University of Manchester, M13 9PL, Manchester, UK

De par le vaste champ d'applications qu'elle offre, l'étude des écoulements granulaires a connu une expansion considérable au cours de ces vingt dernières années autant du point de vue industriel que géophysique. Ces écoulements granulaires ont une grande influence dans le monde qui nous entoure et différentes instabilités hydrodynamiques peuvent naître en leur sein, entraînant alors des changements importants sur les propriétés mêmes de l'écoulement. Les instabilités dues à la ségrégation par taille de particules, le développement d'ondes de surface ou encore l'apparition de ressauts dans l'écoulement en sont des exemples marquants.

## 1 - Le milieu granulaire

Un milieu granulaire peut être vu comme un ensemble de grains de tailles et formes différentes. Par souci de simplicité, nous considérerons ici uniquement des grains dont les tailles sont supérieures à 100 microns. En effet, pour des particules plus petites, les propriétés rhéologiques changent et on parle plus communément de poudres voire de colloïdes pour des tailles inférieures au micron (voir Andreotti *et al.*, 2013 pour une présentation complète). L'une des grandes particularités d'un milieu granulaire est qu'il peut exister sous plusieurs états en même temps au sein d'un écoulement. En effet, on parle d'état solide pour un tas de grains au repos, d'état gazeux lorsque les grains sont très agités et dilués et, entre ces deux cas extrêmes, se trouve l'état dit liquide décrivant des écoulements denses où les grains interagissent par collision et friction. C'est à cet état fluide que va être consacré cet article. En effet, appartenir un écoulement granulaire à un liquide va permettre de se rapprocher des études plus classiques de la mécanique des fluides et en particulier sur les instabilités qui peuvent apparaître dans les écoulements à surface libre.

## 2 - Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires

Les instabilités hydrodynamiques représentent un sujet varié et complexe de la mécanique des fluides, étant à l'origine d'un grand nombre de phénomènes se développant aussi bien à l'échelle planétaire que cellulaire. Ainsi, essayer de prédire leur formation et évolution a mobilisé l'attention de nombreux scientifiques depuis près de deux siècles. La majorité des instabilités hydrodynamiques peut être observée tous les jours et, si leur influence sur notre quotidien n'est pas toujours perceptible, elles peuvent considérablement modifier le comportement des écoulements granulaires géophysiques.

Parmi elles, l'instabilité de "digitation", responsable de la formation de dépôts granulaires en forme de doigts est l'une des plus caractéristiques. Elle apparaît lorsque des matériaux de tailles et propriétés différentes sont présents dans un écoulement. Ceci est particulièrement le cas dans des écoulements géophysiques où la taille des particules peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Au cours de l'écoulement, les particules fines vont avoir tendance à se déplacer vers le fond en tombant dans les

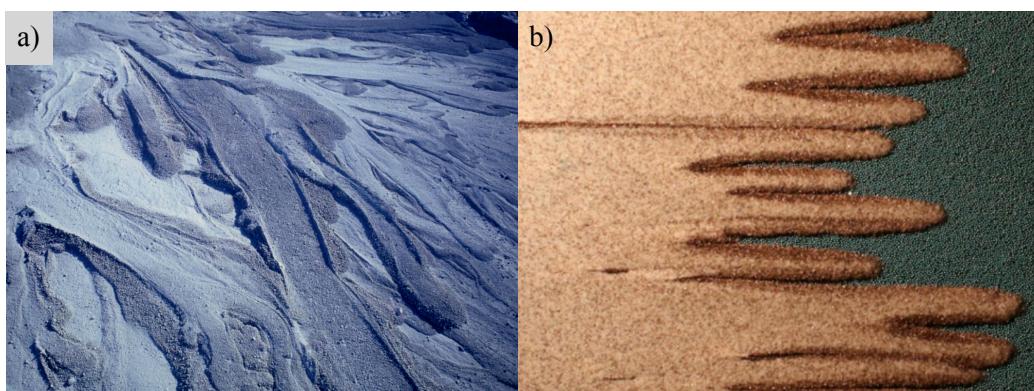


Figure 1 : a) Dépôts caractéristiques observés après l'éruption du Mont-Saint Helens en juin 1980. b) Expérience de laboratoire montrant la déstabilisation du front d'un écoulement granulaire bidisperse. Les grosses particules (marron) migrent vers la surface puis vers le front de l'écoulement. Ayant une friction plus importante que les fines particules blanches, une instabilité de digitation apparaît (images tirées de Baker *et al.*, J. Fluid Mech. 2016).

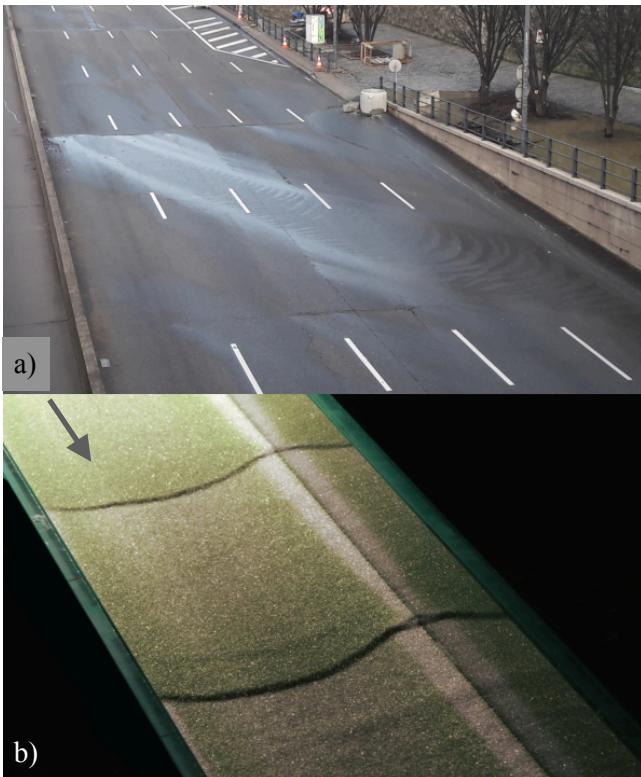


Figure 2 : a) Instabilité de type Kapitza se développant à partir d'une infiltration d'eau dans la route pendant la crue de la Seine à Paris (Février 2018). b) Expérience de laboratoire montrant l'apparition de vagues du même type dans un écoulement granulaire bidisperse constitué de billes de verre sphériques de diamètre 75-150 µm (blanc) et 200-250 µm (vert). La flèche représente le sens de l'écoulement.

principalement constituées de grosses particules, va contraindre l'écoulement en l'empêchant de s'étaler dans la direction transverse à celle de propagation, augmentant ainsi considérablement la distance sur laquelle il s'étend.

Une autre instabilité semblable à celle se développant à la surface d'un film liquide sur un plan incliné peut également exister dans les milieux granulaires. Les modifications de l'écoulement engendrées par cette instabilité peuvent avoir des conséquences importantes dans la prévention des risques naturels et la conception des infrastructures touchées. En effet, lorsqu'une couche granulaire s'écoule sur un lit rigide ou faiblement érodable, et si la pente est suffisamment forte, des ondes de surface peuvent se développer et se propager à des vitesses bien supérieures à celles de l'écoulement non perturbé. Le mécanisme d'apparition de ces ondes est le même, qu'il s'agisse d'un film liquide, d'une coulée de boue ou d'une avalanche (voir figure 2). Il y a une compétition entre les effets dus à la gravité, qui auront tendance à stabiliser l'écoulement, et ceux dus à l'inertie du fluide qui amplifient les perturbations (Charru 2007). Si l'étude de cette instabilité date des travaux précurseurs de Kapitza et Kapitza (1949), l'influence de la ségrégation par taille de particule sur les ondes se développant à la surface d'écoulements granulaires n'a que peu été étudiée. Une étude récente (Viroulet *et al.*, 2018) a montré que les particules les plus grosses ont tendance à s'accumuler au front des vagues, augmentant d'autant plus leur potentiel destructeur (voir figure 2). Cependant, si la concentration initiale de chaque espèce de particules peut modifier les propriétés des vagues engendrées, le critère d'apparition et le mécanisme de l'instabilité restent inchangés.

Enfin, lors d'écoulements géophysiques, les interactions avec la topographie jouent un rôle déterminant sur la vitesse et la direction de l'écoulement. En effet, si dans les deux exemples précédents les écoulements étaient modifiés par des instabilités se développant en leur sein, ces instabilités sont très largement dominées par la topologie du terrain, un relief pouvant modifier brutalement la vitesse ou la direction de propagation de l'écoulement. Une meilleure compréhension des interactions entre un écoulement granulaire sec et un fond solide représente également un grand intérêt, aussi bien dans la conception des protections contre les avalanches que dans les procédés industriels comme les tapis roulants transportant des matériaux. A l'instar

interstices entre les grains, tandis que les particules les plus grosses vont migrer vers la surface. Ce phénomène est appelé "tamisage cinétique". En raison de la friction au sol, les particules situées à la surface vont se déplacer plus vite que celles au fond. Ce cisaillement de vitesse couplé au tamisage cinétique va donner lieu à une accumulation des plus grosses particules au front de l'écoulement. Ce dernier, déstabilisé par les imperfections du sol ne se propage pas de manière rectiligne dans sa direction transverse. Les grosses particules à la surface vont s'accumuler dans les creux de la déformation du front, formant ainsi des dépôts en forme de doigts : c'est l'instabilité de digitation. Celle-ci est illustrée sur la figure 1 où l'on peut observer les formes caractéristiques des dépôt après l'éruption du Mont Saint Helens en 1980. On remarque de longues et fines coulées en forme de doigts avec des digues sur les côtés. Une expérience de laboratoire est également présentée où un mélange granulaire de fines billes de verre sphériques et de particules de sable plus grosses s'écoule le long d'un plan incliné. La déstabilisation du front au cours de l'écoulement est clairement visible et l'on constate que les grosses particules (en marron) sont localisées au front et sur les bords des "doigts". Ce phénomène d'auto-endiguement des écoulements granulaires a une grande importance dans la prévention des risques. En effet, la formation de digues statiques,

des écoulements fluides, des chocs peuvent se créer dans les écoulements granulaires. Ces chocs ou ressauts hydrauliques sont très communs dans les écoulements à surface libre. Ils apparaissent lorsqu'un écoulement passe d'un régime où il est plus rapide que la propagation des ondes de surfaces à plus lent. Cette transition s'accompagne d'une augmentation de la hauteur de l'écoulement afin de maintenir le débit. Ces phénomènes peuvent être observés dans de nombreuses situations comme près de piliers de ponts, dans les mascarets, ou plus simplement dans un évier lorsque le robinet est ouvert. Il a récemment été montré que des chocs stationnaires peuvent également être créés en amont d'une topographie, modifiant considérablement les propriétés de l'écoulement (Viroulet *et al.*, 2017). En l'absence de particules devant l'obstacle, l'écoulement décolle au niveau du sommet de la topographie pour former un jet granulaire. Cependant, en ajoutant simplement une certaine masse de particules devant le relief, il y a formation d'un choc stationnaire lorsque l'écoulement vient impacter cette masse de grain, les propriétés de ce choc étant alors directement liées à la condition en amont de l'écoulement.

Toutes ces instabilités vont donc drastiquement modifier les propriétés des écoulements géophysiques et plus particulièrement leur distance de propagation. Cette dernière représentant le principal danger pour les populations et infrastructures. Des simulations numériques de cas extrêmes sont réalisées pour identifier des zones potentiellement dangereuses afin de créer des cartes de risques. Il est donc primordial d'être capable de reproduire dans ces simulations les instabilités listées ci-dessus si nous voulons améliorer l'exactitude de ces cartes.

### 3 - Résolution numérique : approche intégrée sur la profondeur

Les simulations numériques d'écoulements de fluides sont majoritairement basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes, équivalent au principe fondamental de la dynamique de Newton appliqué à un fluide. A partir des années 2010, l'implémentation de la rhéologie  $\mu(I)$  dans des codes résolvant les équations de Navier-Stokes a permis de reproduire de façon satisfaisante des expériences de laboratoire comme l'effondrement d'une colonne de grains (Lagrée *et al.*, 2011). Cette loi de friction reliant les contraintes normale et tangentielle au cisaillement et à la pression au sein du milieu granulaire a été développée il y a une quinzaine d'années afin de mieux rendre compte de la rhéologie du milieu granulaire. Elle tire son nom du nombre sans dimension appelé nombre inertiel "I" qui représente le rapport entre un temps microscopique de réarrangement et un temps macroscopique lié au cisaillement (voir Andreotti *et al.*, 2011). Cependant, résoudre ces équations avec une résolution suffisante sur des modèles de terrains est très coûteux en temps de calcul et demanderait des moyens colossaux pour appliquer cette méthode à des événements géophysiques.

Afin de simplifier les calculs numériques, des modèles ont été développés utilisant une approche où les paramètres de l'écoulement sont intégrés sur la profondeur de la couche granulaire. Ces modèles sont basés sur l'hypothèse selon laquelle l'épaisseur de l'écoulement est beaucoup plus faible que sa longueur caractéristique et que les vitesses verticales sont négligeables par rapport aux vitesses horizontales. Les équations de conservation de la masse et de quantité de mouvement peuvent donc être intégrées sur la profondeur éliminant de ce fait une dimension et simplifiant drastiquement la résolution numérique. Cette approche, développée au 19ème siècle par A. J. C. Barré de Saint-Venant, a été très largement utilisée dans l'étude d'écoulements en eau peu profonde. Cependant cette méthode n'a été adaptée aux écoulements granulaires qu'au début de années 1990 (Savage & Hutter 1989) et est massivement utilisée depuis pour reproduire des événements géophysiques. Les premières simulations d'écoulements granulaires utilisaient un modèle de friction simplifié de type frottement sec ou Coulomb, supposant un seul angle de friction constant. L'écoulement pouvait se propager à vitesse constante, accélérer ou ralentir si l'angle de la pente était respectivement égal, supérieur ou inférieur à cet angle de friction. Cette approche simplifiée permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans certaines conditions expérimentales, comme par exemple pour un écoulement sur pente lisse. Cependant il est primordial de résoudre les équations dans un système de coordonnées représentant fidèlement la topographie. En effet, comme présenté précédemment, la topologie du terrain va



Figure 3 : Choc stationnaire en amont d'une topographie dans un écoulement granulaire. Le choc est créé par l'ajout de particules en amont de la topographie (d'après Viroulet *et al.*, 2017).

grandement modifier l'écoulement. Le système d'équations obtenu est plus complexe mais permet de mieux tenir compte des termes d'accélération dus à la topographie. Il a été montré récemment qu'une bonne prise en compte de la topographie permet d'améliorer de manière significative l'évolution de la dynamique du glissement et notamment prédire l'existence de choc dans l'écoulement en amont du relief (Viroulet *et al.*, 2017).

L'approximation d'un coefficient de friction constant de type Coulomb n'est cependant plus valide lorsqu'il y a une forte friction à la base de l'écoulement. Dans ces conditions, il est nécessaire d'utiliser une loi rhéologique de type  $\mu(I)$ . Celle-ci fait apparaître, dans les équations intégrées sur la profondeur, un terme source supplémentaire semblable à un terme de type visqueux dont la valeur est directement déduite des propriétés des matériaux constituant le glissement (Gray & Edwards 2014). Cette nouvelle prise en compte de la rhéologie  $\mu(I)$  dans l'approche intégrée sur la profondeur a permis de prédire la fréquence de perturbation nécessaire à partir de laquelle les instabilités à la surface d'un écoulement granulaire s'amplifient jusqu'à donner lieu à l'instabilité d'onde longue. De plus, l'ajout de ce terme visqueux dans la direction transverse à l'écoulement permet de modéliser la courbure du front entre deux parois et de ce fait d'améliorer la modélisation de l'instabilité de digitation (Baker *et al.*, 2016). Or, il semble paradoxal de modéliser les effets de ségrégation par taille de particules avec une approche qui néglige les vitesses verticales. C'est pourquoi, une équation de transport incluant un terme de mélange des particules a été développée et introduite dans les équations intégrées sur la profondeur, permettant alors de reproduire les principaux mécanismes liés à la ségrégation par taille de particule (Gray 2018). La figure 4 représente différentes simulations numériques des instabilités présentées dans la partie précédente en utilisant une approche intégrée sur la profondeur. On constate que les principales caractéristiques de chaque écoulement sont très bien reproduites par les simulations. En particulier, la déstabilisation d'un front en forme de doigts due à la ségrégation par taille de particules et la formation d'un choc stationnaire en amont d'une topographie.

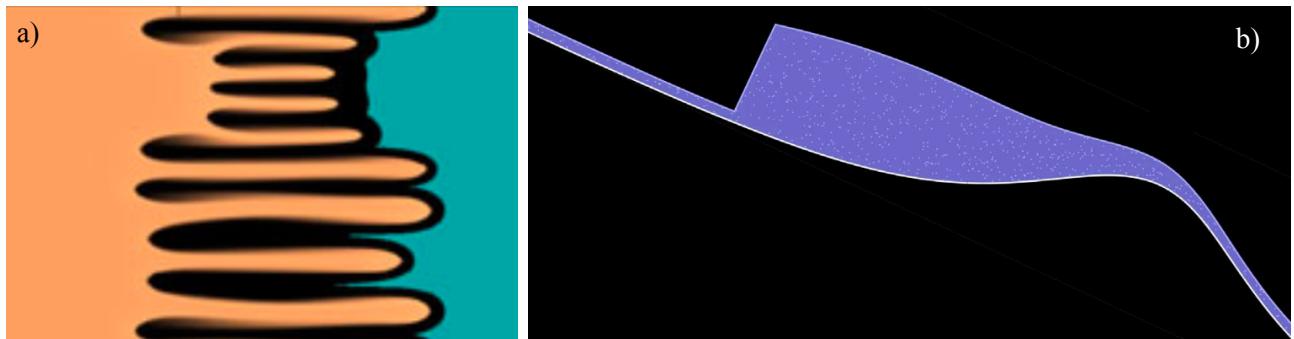


Figure 4 : a) Simulation numérique reproduisant l'instabilité de digitation observée en laboratoire (en noir les grosses particules, en beige les fine particules et en vert le fond rugueux). b) Simulation numérique d'un choc stationnaire se développant en amont d'une topographie comparable au résultat expérimental (figure 3).

#### 4 - Conclusions/perspectives

Au cours de ces vingt dernières années, l'intensification des études portant sur les matériaux granulaires nous a permis de mieux modéliser les écoulements géophysiques tels que les avalanches de neige ou glissements de terrain. Dans la plupart de ces situations, les connaissances en mécanique des fluides "traditionnelle" ont servi de base à l'étude des écoulements granulaires. Cependant, beaucoup reste encore à faire. De nombreux phénomènes présents au sein d'écoulements granulaires géophysiques restent à l'heure actuelle mal compris et donc mal modélisés. Notons par exemple l'extrême mobilité des écoulements géophysiques. En effet, il est difficile d'obtenir numériquement les mêmes dépôts que ceux observés sur le terrain en utilisant des paramètres de friction obtenus lors d'expériences en laboratoire. Ces paramètres de friction doivent être diminués de manière significative pour permettre aux simulations numériques d'atteindre les mêmes distances que celles observées sur le terrain.

Parmi les phénomènes potentiellement responsables de cette grande distance de propagation, on retrouve les échanges entre la quantité de matériaux érodée et déposée au cours de la propagation de l'écoulement. Ces échanges restent un facteur mal compris et cependant primordial à prendre en compte, comme l'ont

montré des expériences en laboratoire. La transition entre les régimes statique/dynamique représentant les grains déposés/érodés dans les écoulements granulaires fait l'objet de nombreuses recherches à l'heure actuelle. Une autre piste pouvant expliquer cette grande mobilité serait la dilatation ou la compression du milieu granulaire au cours de l'écoulement. En effet, tous les résultats présentés précédemment considèrent l'écoulement granulaire comme incompressible. Or c'est loin d'être le cas dans les écoulements géophysiques. Cette dilatation ou compression modifie de manière considérable la friction entre les grains et ainsi la rhéologie du milieu. Enfin, dans la plupart des études portant sur les écoulements granulaires, l'influence d'un fluide environnant est négligée bien que celui-ci peut avoir des effets notables. Il a été montré à l'aide d'expériences et de mesures sur le terrain que le gaz présent dans les coulées pyroclastiques réduit drastiquement la friction entre les grains permettant à l'écoulement de se propager sur des distances plus importantes. Une recherche active à l'heure actuelle consiste à étudier les interactions entre un milieu granulaire et un liquide. A l'instar du gaz, la présence d'eau va complètement modifier la rhéologie du milieu en raison des forces de lubrification, de la formation de ponts capillaires ou encore de la viscosité du fluide. Une meilleure compréhension de ces écoulements en présence d'un liquide ont de nombreuses applications géophysiques comme par exemple les coulées de boues ou les effondrements de canyons sous-marins.

Si la recherche sur les écoulements granulaires a connu un essor considérable ces dernières décennies, beaucoup reste encore à faire si l'on veut pouvoir prédire avec précision le comportement de ces grains à l'échelle géophysique.

## Références

- B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen (2011) *EDP Sciences*.
- J. L. Baker, C. G. Johnson, J. M. N. T. Gray (2016) *J. Fluid Mech.* 809, 168-212.
- F. Charru (2007) *EDP Sciences*.
- J. M. N. T. Gray, A. N. Edwards (2014) *J. Fluid Mech.* 755, 503-534.
- J. M. N. T. Gray (2018) *Ann. Rev. Fluid Mech.* 50, 407-433.
- P. L. Kapitza, S. P. Kapitza (1949) *Zh. Ekper. Teor. Fiz.*, 19, 105. (English transl. in *Collected Papers of P. L. Kapitza* (ed. D. Ter Haar), pp. 690-709, 1965)
- P.-Y. Lagrée, L. Staron, S. Popinet (2011) *J. Fluid Mech.* 686, 378-408.
- S. B. Savage, H. K. Hutter (1989) *J. Fluid Mech.* 199, 177-215.
- S. Viroulet, J. L. Baker, A. N. Edwards, C. G. Johnson, C. Gjaltema, P. Clavel, J. M. N. T. Gray (2017) *J. Fluid Mech.* 815, 77-116.
- S. Viroulet, J. L. Baker, F. M. Rocha, C. G. Johnson, B. P. Kokelaar, J. M. N. T. Gray (2018) *J. Fluid Mech.* 848, 836-875.