

# Les instabilités hydrodynamiques dans les écoulements granulaires géophysiques

Sylvain Viroulet<sup>(1)</sup> (sylvain.viroulet@imft.fr), James L. Baker<sup>(2)</sup>, Andrew N. Edwards<sup>(3)</sup> et J.M.N.T. Gray<sup>(3)</sup>

(1) Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, 2 allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse

(2) School of Civil Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australie

(3) 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. Or, différentes instabilités hydrodynamiques peuvent naître en leur sein, entraînant alors des changements importants des 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.

## Le milieu granulaire

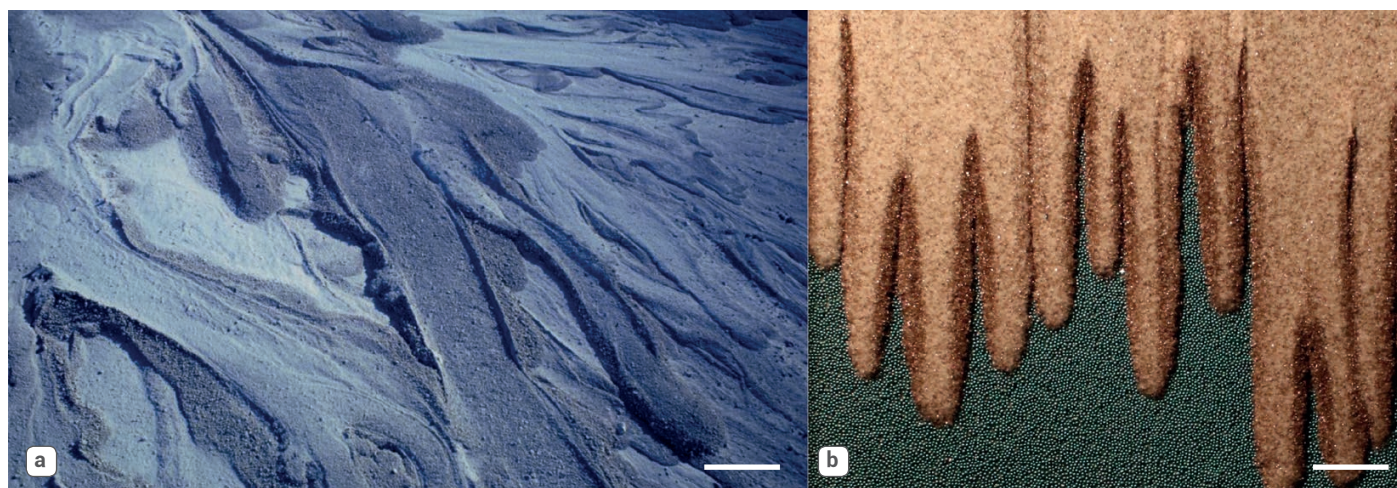
Un milieu granulaire peut être vu comme un ensemble de grains de tailles et formes différentes. Par souci de simplicité, nous considérerons ici uniquement des grains dont les tailles sont supérieures à 100 microns. En effet, pour des particules plus petites, les propriétés rhéologiques changent et on parle plus communément de poudres, voire de colloïdes pour des tailles inférieures au micron (voir Andreotti *et al.* [1] 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 liquide que va être consacré cet article. En effet, apparenter un écoulement granulaire à un liquide va permettre de se rapprocher des études plus classiques de la mécanique des fluides et, en particulier, de celles portant sur les instabilités qui peuvent apparaître dans les écoulements à surface libre.

## 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 leur 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 néanmoins 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 grains de tailles et de 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 auront tendance à se



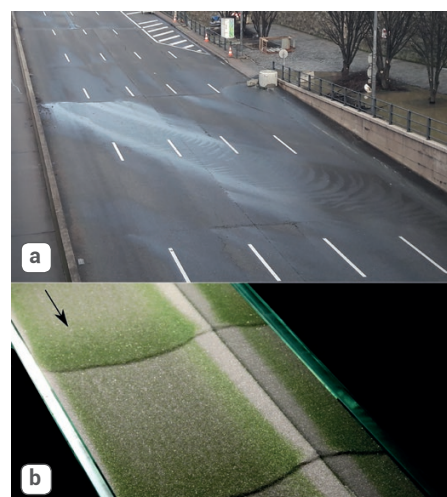
**1. Instabilités de digitation.** (a) Dépôts caractéristiques observés après l'éruption du mont Saint Helens en juin 1980 (photo Dan Miller et USGS). (b) Expérience de laboratoire montrant la déstabilisation du front d'un écoulement granulaire bidisperse le long d'un plan incliné. Les grosses particules (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.* [9]). La barre blanche représente une distance de 10 m sur la figure a) et 2,5 cm sur la figure b).

déplacer vers le fond en tombant dans les interstices entre les gros grains, tandis que 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. Ayant des propriétés frictionnelles plus importantes que celles situées au fond de l'écoulement, ces particules vont ralentir la progression des creux et accentuer 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 1a, où l'on peut observer les formes caractéristiques des dépôts après l'éruption du mont Saint Helens aux USA 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 (fig. 1b), 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 (marron) sont localisées dans les creux du front et sur les bords des « doigts ». Ce phénomène

d'auto-engageement des écoulements granulaires a une grande importance dans la prévention des risques. En effet, la formation de digues statiques parallèles à la direction 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 (fig. 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 [2]. Si l'étude de cette instabilité date des travaux précurseurs de Kapitza et Kapitza [3], l'influence de la ségrégation par taille de particule sur les ondes se développant à la surface d'écoulements granulaires n'a



**2. Ondes à la surface d'un liquide ou d'une couche granulaire s'écoulant sur un plan incliné.** (a) Instabilité de type Kapitza se développant à partir d'une infiltration d'eau dans la route pendant la crue de la Seine (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  $\mu\text{m}$  (blanc) et 200-250  $\mu\text{m}$  (vert). La flèche représente le sens de l'écoulement (images tirées de Viroulet *et al.*, [4]).

que peu été étudiée. Une étude récente [4] a montré que les particules les plus grosses ont tendance à s'accumuler au front des vagues (fig. 2), augmentant d'autant plus leur potentiel destructeur. Cependant, si les propriétés des vagues engendrées dépendent de la concentration initiale de chaque espèce de particules, le critère d'apparition et le mécanisme de l'instabilité restent inchangés.

Enfin, lors d'écoulements géophysiques, les interactions avec la topographie du terrain sous-jacent vont avoir une influence déterminante 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 présente 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. À l'instar 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 surface, 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 nombreux endroits : près de piliers de ponts, dans les mascarets, ou plus simplement dans un évier lorsque le robi-

net est ouvert. Il a récemment été montré que des chocs stationnaires peuvent également être créés en amont d'une irrégularité topographique du sol, modifiant considérablement les propriétés de l'écoulement [5]. En l'absence de particules devant l'obstacle, l'écoulement décolle au niveau du sommet de ce dernier pour former un jet granulaire. Cependant, en ajoutant simplement une certaine masse de particules statiques devant le relief, il y a formation d'un choc stationnaire lorsque l'écoulement vient impacter cette masse de grains (fig. 3). Toutes les particules initialement présentes devant la bosse sont balayées lors de l'impact ; les propriétés du choc sont alors directement liées à la condition initiale 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.

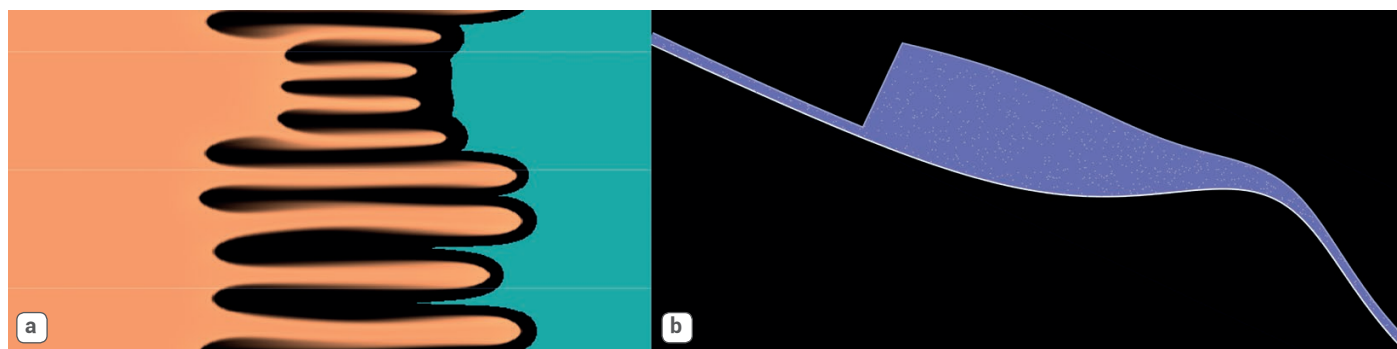
## Résolution numérique : approche intégrée sur la profondeur

Les simulations numériques d'écoulements de fluides sont majoritairement basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes, équivalentes au principe fondamental de la dynamique de Newton appliqué à un fluide. À partir des années 2010, l'implémentation de la rhéologie dite «  $\mu(I)$  » 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 [6]. Cette rhéologie reliant les contraintes normale et tangentielle au taux de cisaillement et à la pression au sein du milieu granulaire a été développée il y a une quinzaine d'années. Elle tire son nom d'un 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.* [1] pour plus de détails). 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 la 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 19<sup>e</sup> siècle par A. J. C. Barré de Saint-Venant, a été très largement utilisée dans l'étude d'écoulements en eau peu profonde. Cependant, elle n'a été adaptée aux écoulements granulaires qu'au début des années 1990 [7] ; depuis, elle est massivement utilisée pour reproduire des événements géophysiques. Les premières simulations d'écoulements granulaires utilisaient un modèle de friction simplifié de type frottement sec ou de Coulomb, où l'on suppose que le coefficient de friction  $\mu$  reliant les



3. Expérience de laboratoire illustrant la formation d'un choc stationnaire au sein d'un écoulement granulaire. Le choc est créé par l'ajout de particules en amont de la bosse, qui vont ralentir l'écoulement lors de l'impact. (D'après Viroulet *et al.* [4]).



#### 4. Simulations numériques d'instabilités d'écoulements granulaires.

(a) Simulation numérique reproduisant l'instabilité de digitation observée en laboratoire (en noir les grosses particules, en beige les particules fines et en vert le fond rugueux), à comparer avec l'expérience de la figure 1b.

(b) Simulation numérique d'un choc stationnaire se développant en amont d'une anomalie topographique, comparable au résultat expérimental de la figure 3.

contraintes normales et tangentielles est constant. L'écoulement pouvait se propager à vitesse constante, accélérer ou ralentir si l'angle de la pente  $\theta$  était respectivement égal, supérieur ou inférieur à un angle de friction valant  $\tan(\mu)$ . Malgré sa simplicité, cette approche 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 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 celle-ci permet d'améliorer de manière significative la description de la dynamique du glissement et, notamment, de prédire l'existence de chocs dans l'écoulement en amont du relief [5].

L'approximation d'un coefficient de friction constant de type Coulomb n'est cependant plus valable 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 impliqués dans le glissement [8]. 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 [9]. 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 [10]. 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 (fig. 4a) et la formation d'un choc stationnaire en amont d'une topographie en forme de bosse (fig. 4b).

### Conclusion et perspectives

Au cours de ces vingt dernières années, l'intensification des études portant sur les matériaux granulaires a permis de mieux modéliser les écoulements géophysiques tels que les avalanches de neige ou les 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 à faire. De nombreux phénomènes présents au sein d'écoulements granulaires géophysiques sont encore mal compris à l'heure actuelle, 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 déduits 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 les quantités de matériaux érodés et déposés 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 et 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 reposent sur l'hypothèse d'un écoulement granulaire 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 puisse 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. Aujourd'hui, une recherche active consiste à étudier les interactions entre un milieu granulaire et un liquide. À l'instar d'un 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 aura de nombreuses applications géophysiques sur les coulées de boues ou les effondrements de canyons sous-marins, par exemple.

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

#### Références

- 1• B. Andreotti, Y. Forterre et O. Pouliquen, *Les milieux granulaires. Entre fluides et solides*, EDP Sciences (2011).
- 2• F. Charru, *Instabilités hydrodynamiques*, EDP Sciences (2007).
- 3• P. L. Kapitza et S. P. Kapitza, *Zh. Ekper. Teor. Fiz.* **19** (1949) 105. (Traduction en anglais dans *Collected Papers of P. L. Kapitza*, ed. D. Ter Haar (1965), pp. 690-709)
- 4• S. Viroulet et al., *J. Fluid Mech.* **848** (2018) 836-875.
- 5• S. Viroulet et al., *J. Fluid Mech.* **815** (2017) 77-116.
- 6• P.-Y. Lagrée, L. Staron et S. Popinet, *J. Fluid Mech.* **686** (2011) 378-408.
- 7• S. B. Savage et H. K. Hutter, *J. Fluid Mech.* **199** (1989) 177-215.
- 8• J. M. N. T. Gray et A. N. Edwards, *J. Fluid Mech.* **755** (2014) 503-534.
- 9• J. L. Baker, C. G. Johnson et J. M. N. T. Gray, *J. Fluid Mech.* **809** (2016) 168-212.
- 10• J. M. N. T. Gray, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **50** (2018) 407-433.