

Effondrement granulaire dans l'eau : application à la génération de tsunami.

S. Viroulet^a, A. Sauret^{a,b}, O. Kimmoun^a & C. Kharif^a

a. IRPHE, CNRS UMR 7342 - Aix-Marseille University - AMU - Ecole Centrale Marseille, France

b. Princeton University, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, NJ 08544, USA

Résumé :

L'étude et la prédiction des écoulements granulaires est nécessaire aussi bien dans le domaine industriel que géophysique, afin de déterminer, par exemple, la dynamique de remplissage d'un silo à grains ou la distance parcourue par un glissement de terrain. Si les différentes configurations d'écoulements granulaires secs ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, ce n'est pas le cas d'un milieu granulaire en présence d'eau. L'objectif de cette étude est de caractériser le comportement d'un effondrement granulaire, initialement sec, dans l'eau et son influence sur la vague générée. Nous quantifions l'influence des différents paramètres expérimentaux : l'angle de la pente, la hauteur d'eau, la masse initiale de matériaux ainsi que le type de grains. Cette étude est particulièrement pertinente afin d'évaluer les risques d'inondation par tsunami lors d'un effondrement de falaise.

Abstract :

The study and prediction of dense granular flows plays an important role in industrial and geophysical applications, such as the filling of a grain silo or the prediction of the runout of a landslide. Dry granular flows have been widely studied during the last decade for various configurations, however adding water to the granular material complicates drastically the situation. The aim of this study is to describe the dynamic of the granular flow, initially dry, during its collapse into water and the amplitude of the generated wave. We quantify systematically the influence of the experimental parameters : the slope, the height of the water, the initial mass and the nature of granular materials. This study is fully relevant to assess the risk of flooding by tsunamis induced by cliffs failure.

Mots clefs : granulaire, vague, effondrement

1 Introduction

Les écoulements granulaires sont présents dans de nombreux domaines industriels, par exemple lors des procédés de fabrication dans les industries pharmaceutiques et alimentaires. Ils sont également omniprésents lors de l'étude des écoulements naturels [6]. Une caractérisation plus fine de leur dynamique peut permettre une meilleure évaluation des risques causés par les avalanches, les coulées volcaniques ou les glissements de terrain qui peuvent causer des dommages considérables sur le plan humain et sur le plan matériel où les dégâts se chiffrent souvent en millions d'euros. La modélisation du comportement d'un milieu granulaire modèle est donc d'une grande importance dans ces différents domaines et tout particulièrement pour la prévention de ces risques naturels.

Depuis le travail pionnier de Bagnold en 1954 [1], un grand nombre d'études a été mené sur les écoulements denses de grains secs afin de mieux cerner leur dynamique [4]. Ces études ont été effectuées pour une grande variété de configurations d'écoulement, du simple effondrement d'une colonne de sable [2, 8, 9] à celle d'un tambour tournant [5], afin d'obtenir des modèles capables de reproduire les observations expérimentales telles que la loi de comportement $\mu(I)$ [7]. Si des progrès considérables quant à la compréhension des écoulements granulaires secs ont été effectués ces dix dernières années,



FIGURE 1 – (a) Photographie du Cap Canaille surplombant la baie de Cassis (France) et de hauteur maximale 363 m susceptible de s'effondrer un jour. (b) Position géographique du cap Canaille.

les écoulements immergés restent bien moins connus. En effet la présence d'un fluide environnant modifie la rhéologie du matériaux granulaire et des effets antagonistes apparaissent. Le fluide peut ralentir l'écoulement granulaire mais en même temps le fluidifier ce qui au contraire peut étendre la propagation [3, 15, 16].

Une situation encore plus complexe est l'impact d'un milieu granulaire, initialement sec, dans l'eau mais cette situation a été très peu étudiée. Cette configuration est cependant d'une importance majeure pour la prévention des risques induit par un tsunami près des côtes. En effet les vagues de tsunami peuvent être générées par de nombreux événements géophysiques dont les plus fréquents sont les tremblements de terre sous-marins. Cependant, étant situé le plus souvent à proximité des côtes, les tsunami générés par un glissement de terrain peuvent être localement bien plus dévastateurs voire même donner lieu dans certains cas extrêmes à ce que l'on appelle des méga-tsunamis [12]. Dans certaines régions du monde, des falaises surplombant la mer sont susceptibles de s'effondrer et dans certains cas, la topographie du lieu pourrait entraîner des risques importants pour la population (voir par exemple la situation présentée en Fig. 1.a et 1.b).

Plusieurs études ont été menées afin de prédire l'évolution de ces vagues en assimilant le glissement de terrain à un bloc solide [10, 17] ou à la configuration plus réaliste d'un milieu granulaire [11]. Cette dernière situation a principalement été étudiée pour des nombres de Froude à l'impact $Fr = v_s / \sqrt{gH}$ supérieurs à un (avec v_s la vitesse du glissement, H la profondeur d'eau et g la constante de gravitation), et sans tenir compte de l'influence du milieu granulaire sur la génération de la vague. Nous présentons ici une étude expérimentale réalisée pour un nombre de Froude à l'impact inférieur à un et pour différents matériaux granulaires. Dans ces configurations, les conditions aux limites peuvent jouer un rôle déterminant sur l'écoulement granulaire et donc sur la vague générée [14].

2 Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 2. Il se compose d'un aquarium de 220 cm de long, 40 cm de haut et 20 cm de large. Afin d'estimer l'influence de la nature du milieu granulaire sur la vague générée (taille, polydispersité, sphéricité), quatre type de matériaux ont été utilisés. Des billes de verre sphériques de diamètres respectifs 1,5 mm, 4 mm et 10 mm et ayant une masse volumique $\rho_b = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$. Des expériences ont également été menées avec du sable d'aquarium d'un diamètre moyen de 4 mm et de masse volumique $\rho_s = 2400 \text{ kg.m}^{-3}$ modélisant un milieu polydisperse non sphérique. Le réservoir initial de grains est situé sur un le coté de l'aquarium et est délimité par une porte se levant verticalement. L'ouverture de cette porte est suffisamment rapide, typiquement de l'ordre de 2 m.s^{-1} , pour que la forme du tas granulaire ne soit pas modifié avant l'effondrement. Les grains s'écoulent ensuite sur une pente, d'angle variable, sur lesquelles ont été collés les grains correspondant pour assurer une condition de non glissement [3, 14]. L'évolution de l'effondrement granulaire ainsi que la génération de la vague ont été enregistrées à l'aide d'une caméra

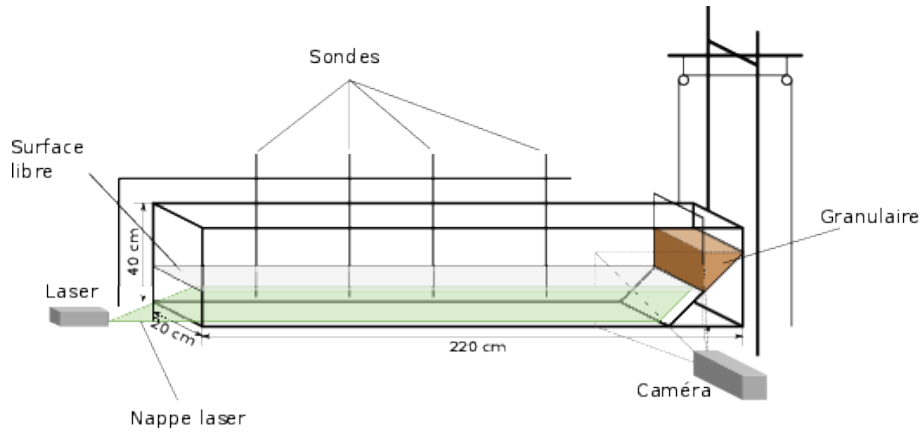


FIGURE 2 – Schéma du dispositif expérimental.

rapide (Vision Research Phantom V641) à une cadence de 100 images/s. Nous avons également mesuré l'amplitude de la vague lors de sa propagation à l'aide de 4 sondes résistives situées à 0,45 m, 0,75m, 1,05 m et 1,35 m de la porte maintenant le granulaire [17].

3 Résultats expérimentaux

Les expériences ont été réalisées en variant systématiquement la nature et la masse de granulaire ainsi que l'angle de la pente. Une série d'images montrant l'effondrement de 2 kg de sable d'aquarium le long d'une pente inclinée de 55° par rapport à l'horizontale est représentée sur la figure 3. L'ouverture de la trappe est suffisamment rapide pour que le front du tas granulaire reste initialement quasi-vertical (Fig. 3.a). Le milieu granulaire impacte l'eau et génère une vague (Fig. 3.b). Au cours de l'effondrement, un tourbillon est généré à l'interface entre le milieu granulaire et l'eau. Ce tourbillon crée un écoulement dans le sens opposé à celui du milieu granulaire et peut, dans certains cas, ralentir voire même arrêter momentanément l'écoulement granulaire (Fig. 3.c). Finalement la vague générée continue sa propagation et l'écoulement granulaire se rapproche de sa forme finale (Fig. 3.d). Le but de cette étude est de pouvoir prédire l'amplitude de la vague générée et sa propagation en fonction des paramètres expérimentaux afin de pouvoir extrapoler ces résultats à des situations géophysiques, tel que l'effondrement possible d'une falaise.

3.1 Propagation de la vague générée

Supposons que l'on connaisse l'amplitude initiale de la vague. Dans l'approximation d'eau peu profonde et de vagues faiblement non-linéaires, nous pouvons décrire l'évolution spatio-temporelle de la perturbation η à l'aide de l'équation de Korteweg-de-Vries linéarisée [13] :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{c H^2}{6} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

où H représente la hauteur d'eau et $c = \sqrt{gH}$ est la vitesse de propagation de la perturbation. Une solution de cette équation peut s'écrire sous forme d'une fonction d'Airy :

$$\eta(x, t) = Q \left(\frac{2}{ctH^2} \right)^{1/3} \text{Ai} \left[\left(\frac{2}{ctH^2} \right)^{1/3} (x - ct) \right]. \quad (2)$$

où, en deux dimensions, Q est une constante représentant l'aire d'eau déplacée et Ai la fonction d'Airy. La relation (2) prédit qu'au cours de sa propagation, l'amplitude de la première vague décroît en fonction du temps comme $t^{-1/3}$.

Nous avons représenté sur la Fig. 4 l'amplitude de la première vague à chacune des quatre sondes pour trois masses de milieu granulaire différentes (1, 2 et 3 kg). La décroissance en temps de l'amplitude

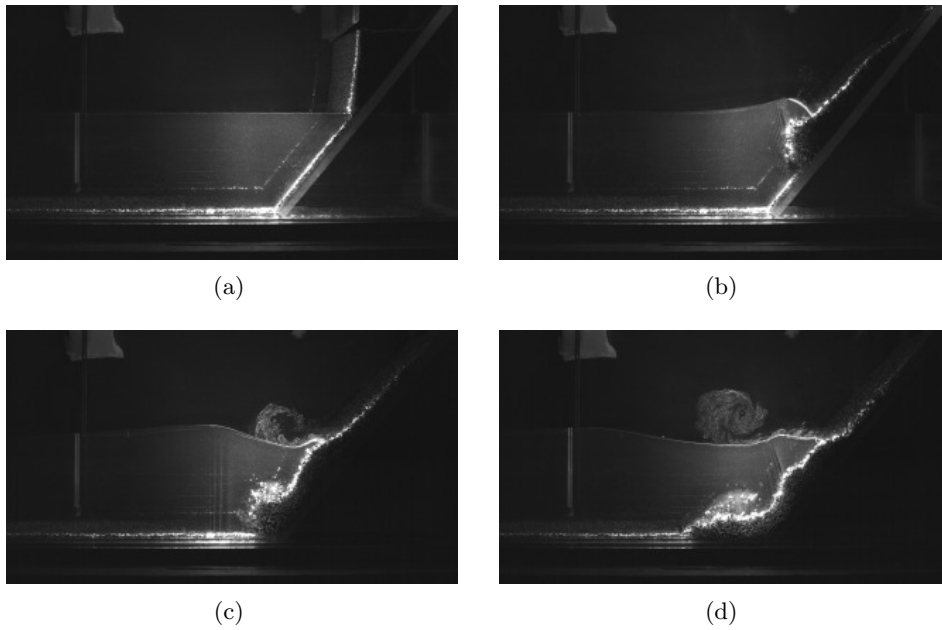


FIGURE 3 – Série d'images représentant la génération d'une vague par l'effondrement de 2 kg de sable d'aquarium sur une pente de 55° . (a) $t = 0$ s, (b) $t = 0.20$ s, (c) $t = 0.40$ s et (d) $t = 0.60$ s.

au cours de sa propagation est très proche de $t^{-1/3}$ dans chaque cas. Ce premier résultat suggère que pour toute condition initiale lors de la génération de la vague, l'amplitude de la première vague va décroître en $t^{-1/3}$ au cours de la propagation (voir par exemple [17]).

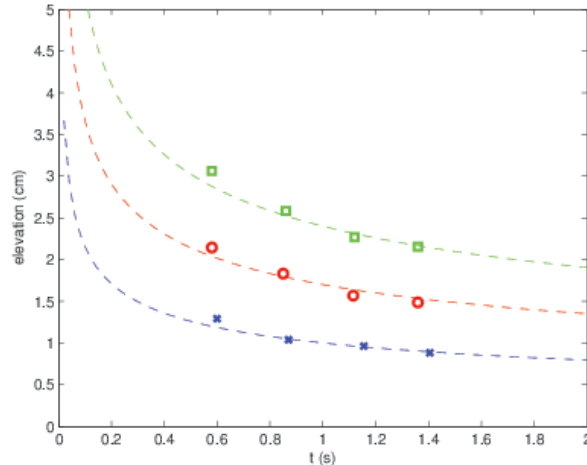
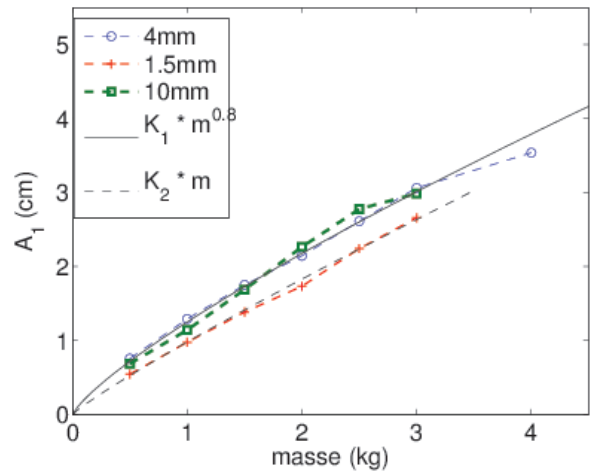


FIGURE 4 – Evolution de l'amplitude de la vague générée en fonction du temps pour une masse de $m = 1$ kg (en bleu), $m = 2$ kg (en rouge) et $m = 3$ kg (en vert). Les symboles représentent les mesures des sondes et les courbes en pointillés une décroissance en $t^{-1/3}$.

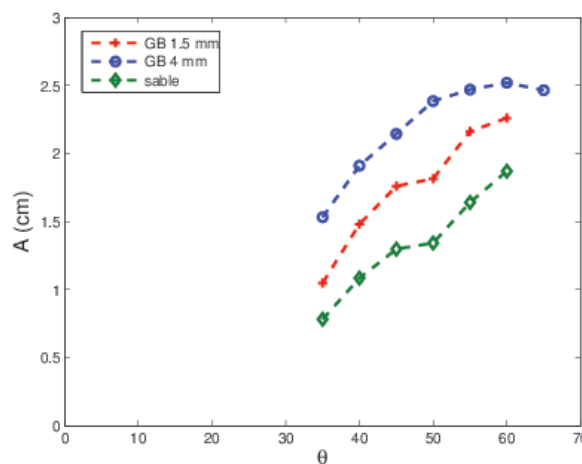
3.2 Génération de la vague

L'évolution temporelle de l'amplitude de la vague lors de sa propagation étant caractérisé, il est maintenant nécessaire de pouvoir déterminer l'amplitude de la vague à la fin de sa génération en fonction des différents paramètres du problème : l'angle de la pente, la masse et le type de granulaire. Des résultats préliminaires sont reportés sur la figure 5.a où nous avons tracé l'évolution de l'amplitude

de la première vague à la première sonde en fonction de la masse initiale de granulaire pour une pente fixe et égale à 45° . Pour les trois types de granulaire testés ici (billes sphérique de 1,5, 4 et 10 mm de diamètre), l'amplitude augmente avec la masse qui s'effondre dans l'eau. Cette première série d'expériences montre également que l'amplitude de la vague ne semble pas, ou peu, être influencée par la taille des grains considérés. En effet pour une masse donnée, l'amplitude de la vague est sensiblement la même avec les billes de 4 et 10 mm et légèrement plus faible pour les billes de 1,5 mm, ce qui pourrait s'expliquer par des effets capillaires.



(a)



(b)

FIGURE 5 – (a) Evolution de l'amplitude de la vague générée mesurée à la première sonde en fonction de la masse de grains pour des billes sphérique de 1.5 mm (en rouge), 4 mm (en bleu) et 10 mm (en vert). (b) Evolution de l'amplitude de la vague générée en fonction de l'angle de la pente.

L'évolution de l'amplitude de la vague mesurée à la première sonde en fonction de l'angle de la pente pour une masse de granulaire de 2 kg est représentée sur la figure 5.b. L'amplitude de la vague augmente naturellement avec l'angle de la pente par rapport à l'horizontale. Cependant, cette augmentation semble atteindre une limite à partir d'une certaine pente. On constate par exemple que pour les billes de 4 mm, et une pente supérieure à 50° , l'amplitude de la première vague n'augmente plus. Ceci semble provenir du fait que pour des pentes supérieures, un nouveau régime semble dominer où le creux et la seconde vague générée après runup le long de la pente sont nettement plus important que pour les angles plus faibles. Le maximum d'énergie que peut transmettre le glissement à la première vague semble être atteint, l'excédant se retrouvant alors dans les vagues suivantes. Ce point est encore l'objet

d'études plus détaillées.

4 Conclusion

Une première série d'expériences réalisée à nombre de Froude inférieur à un, permet de compléter les études précédentes sur la génération de vagues de tsunami par glissement de terrain aérien.

Nous avons mis en évidence dans cette étude que l'amplitude de la première vague semble décroître au cours de sa propagation en $t^{-1/3}$, et ce, indépendamment de la condition initiale. Au cours de la génération, l'amplitude de la vague dépend directement de l'angle de la pente et de la masse de grains considérée. Cependant l'évolution de l'amplitude de la vague avec ces paramètres semble changer au-delà de certaines valeurs. En effet, l'influence de la masse pour l'amplitude de la première vague générée semble diminuer lorsque la masse devient importante. Le même comportement semble également présent aux fortes pentes. Ces premiers résultats expérimentaux démontrent la complexité des écoulements granulaires en présence d'eau et une étude systématique des différents paramètres est actuellement en cours.

Références

- [1] Bagnold, R.A. 1954 Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. Roy. Soc. A* **225** 49-63
- [2] Balmforth, N. J., & Kerswell, R. R. 2005 Granular collapse in two dimensions. *J. Fluid Mech.* **538**, 399-428
- [3] Cassar C., Nicolas M. & Pouliquen O. 2005 Submarine granular flows down inclined planes *Phys. Fluids* **17** 103301
- [4] Forterre, Y. & Pouliquen, O. 2008 Flows of dense granular media. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **40**, 1-24
- [5] Gray J. M. N. T. 2001 Granular flow in partially filled slowly rotating drums. *J. Fluid. Mech* **441** 1-29
- [6] Iverson, .R.M., Reid, M.E. & LaHusen, R.G. 1997 Debris Flow Mobilization from Landslides. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **25**, 85-138
- [7] Jop P., Forterre Y. & Pouliquen O. 2006 A constitutive law for dense granular flows. *Nature* **441**, 727
- [8] Lagrée P.-Y., Staron L. & Popinet P. 2011 The granular column collapse as a continuum : validity of a Navier-Stokes model with a $\mu(I)$ -rheology. *J. Fluid. Mech* **686** 378-408
- [9] Lajeunesse, E., Mangeney-Castelnau, A., & Vilotte, J. P. 2004 Spreading of a granular mass on a horizontal plane. *Phys. Fluids* **16**(7), 2371
- [10] Liu, P., Wu, T., Raichlen, F., Synolakis, C., & Borrero, J. 2005 Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses. *J. Fluid. Mech* **536**(1), 107-144
- [11] Mohammed F. & Fritz H. M. 2012 Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *J. Geo. Res.* **117**, C11
- [12] Mohammed F. & Fritz H. M. 2013 Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary. *Pure Appl. Geophys.* **166**(1-2), 153-175
- [13] Pelinovsky, E., Talipova, T., & Kharif, C. 2000. Nonlinear-dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water. *Physica D : Nonlinear Phenomena* **147**(1-2), 83-94.
- [14] Pouliquen O. 1999 Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Phys. Fluids* **11**(3), 542-548
- [15] Rondon, L., Pouliquen, O., & Aussillous, P. 2011 Granular collapse in a fluid : role of the initial volume fraction. *Phys. Fluids* **23**, 073301
- [16] Topin V., Monerie Y., Perales F. & Radjai F. 2012 Collapse dynamics and runout of dense granular materials in a fluid. *Phys. Rev. Lett.* **11**(3), 542-548
- [17] Viroulet, S., Cébron, D., Kimmoun, O. & Kharif, C. 2013 Shallow water waves generated by subaerial solid landslides. *Geophys. J. Int.* doi : 10.1093/gji/ggs133