

Écoulement granulaire fluidisé impactant l'eau : Application aux tsunamis volcaniques

A. Bougouin*, R. Paris & O. Roche

Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, F-63000
Clermont-Ferrand, France ; * alexis.bougouin@uca.fr

Résumé :

Les tsunamis générés par l'entrée d'une masse granulaire dans l'eau ne représentent qu'une faible proportion des tsunamis répertoriés dans le monde. Toutefois, ils peuvent localement causer d'importants dégâts humains et matériels car ils sont généralement créés proche des côtes. Afin d'identifier les mécanismes physiques contrôlant les propriétés des vagues induites, la configuration simplifiée d'un matériau granulaire impactant l'eau a été largement étudiée en laboratoire. Cette étude étend la configuration au cas d'un écoulement granulaire fluidisé, représentatif des tsunamis générés par des écoulements pyroclastiques lors d'éruptions volcaniques. Nous montrons qu'en configuration de rupture de barrage (dam-break), le processus de fluidisation améliore la mobilité de l'écoulement granulaire, caractérisée par une augmentation de la vitesse du front et de la distance de propagation de la masse. La conséquence est une amplitude de vague plus grande par rapport à une situation analogue sans fluidisation. L'influence de la vitesse d'impact et de la masse sur l'amplitude de la vague est également confirmée en variant la hauteur initiale de la colonne granulaire relâchée. Finalement, nous montrons que la hauteur d'eau n'affecte pas les caractéristiques de la vague, dans la gamme des paramètres considérées ici.

Abstract :

Tsunamis generated by the collapse of a granular mass into water represent a low amount of documented tsunamis in the world. However, they can locally cause severe human and material damages as they occur near coastlines. In order to identify physical mechanisms controlling the features of induced waves, the simple configuration of a granular material entering into water has been widely investigated. This study extends the configuration to the case of a fluidized granular flow, representative of tsunamis generated by pyroclastic flows during volcanic eruptions. We show that, in dam-break configuration, the fluidization process enhances the mobility of the granular flow with larger front velocities and larger propagation distances of the mass. The consequence is a significant increase of the maximum wave amplitude in comparison to an analogous situation without fluidization. The influence of the impact velocity and of the mass on the amplitude of the wave is also supported by varying the initial height of the granular column released. Finally, we show that the level of water does not affect the characteristics of the wave, in the range of parameters considered here.

Mots clefs : Tsunamis, milieu granulaire, fluidisation

1 Introduction

Les tsunamis sont des vagues de grandes longueurs d'onde générées lors d'évènements géophysiques extrêmes. Généralement provoqués lors de tremblements de terre sous-marins, d'autres mécanismes peuvent également induire des vagues de tsunami, tels que les impacts de météorites, les glissements de terrain et les avalanches rocheuses, les explosions sous-marines et les écoulements gravitaires en contexte volcanique [1, 2]. Dans ce dernier cas, l'exemple le plus récent correspond au tsunami généré par un glissement de flanc lors de l'éruption du volcan Krakatau (Indonésie), en 2018, causant plus de 400 morts et d'importants dégâts matériels. Plusieurs tsunamis générés par des écoulements pyroclastiques ont également été répertoriés lors des éruptions de la Soufrière Hills (Montserrat, Antilles), en activité depuis 1995 [3]. Enfin, des cas historiques témoignent de l'ampleur potentielle des dégâts comme les tsunamis lors de l'éruption du volcan Krakatau, en 1883, et celle du mont Unzen (Japon), en 1792 [4, 5].

Afin d'appréhender la situation complexe des tsunamis générés par l'impact d'une masse granulaire dans l'eau, la configuration la plus simple consiste à modéliser le milieu granulaire comme un bloc solide. L'impact du bloc génère un train d'ondes dont la vague en-tête correspond à la vague dominante [7]. Les caractéristiques de cette vague dépendent de nombreux paramètres, comme par exemple la géométrie de l'objet, la vitesse et l'accélération à l'impact, et la profondeur d'eau [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Toutefois, cette approche s'affranchit de la nature déformable du milieu granulaire qui affecte quantitativement les caractéristiques de la vague [12, 13]. Ainsi, la configuration plus réaliste d'une masse granulaire impactant l'eau a été largement étudiée dans la littérature. La plupart de ces études proposent des modèles empiriques pour prédire les caractéristiques des vagues induites [13, 14, 15, 18]. Basées sur de multiples régressions en fonction des paramètres adimensionnels du problème, elles permettent de fournir des lois de fermeture pour les modèles de prévision des aléas. Néanmoins, ces modèles ne permettent pas d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques contribuant à la génération de vagues. De récentes études ont considéré l'impact d'un matériau granulaire dans l'eau, sur un plan horizontal ou incliné, en variant chaque paramètre indépendamment des autres [16, 17]. Il a été mis en évidence que la masse granulaire et la pente affectent fortement l'amplitude et la longueur d'onde de la vague.

Dans cette étude, nous étendons la configuration aux écoulements granulaires fluidisés, représentatif des tsunamis générés par des écoulements pyroclastiques lors d'éruptions volcaniques. La fluidisation de l'écoulement granulaire permet de reproduire en laboratoire la grande mobilité des écoulements pyroclastiques [19]. Cette étude aborde le rôle de la fluidisation sur la dynamique de l'écoulement granulaire et sur les caractéristiques de la vague générée à l'impact. Également, l'influence de la hauteur initiale de la colonne granulaire relâchée et celle de la hauteur d'eau sont quantifiées.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en un canal transparent de section rectangulaire de 7 m de long, 0.8 m de haut et 0.2 m de large (figure 1). Deux systèmes de coordonnées respectifs sont définis pour quantifier l'évolution spatiale de l'écoulement granulaire et l'élévation de la surface libre d'eau : (x_g, y_g) suivant la topographie du fond du canal et (x_w, y_w) ayant pour origine le point d'impact. En amont, le canal est équipé d'un réservoir de particules, délimité par une trappe coulissante reliée à une masse suspendue, et prolongé d'un plan incliné à 15° . La longueur du réservoir est constante et égale à $L_i = 0.34$ m. Le plan incliné est composé d'une partie aérienne, d'un mètre de long, et d'une partie immergée, dont la longueur varie entre 0.5 m et 1.5 m avec la hauteur d'eau, définissant ainsi une hauteur d'eau allant

jusqu'à $H_o = 38.5 \pm 0.1$ cm. Le réservoir et la partie aérienne du plan incliné sont équipés d'une plaque poreuse permettant la fluidisation du milieu granulaire par injection d'un flux d'air vertical. En aval, le canal est équipé d'un brise-vague afin de limiter la réflexion des vagues.

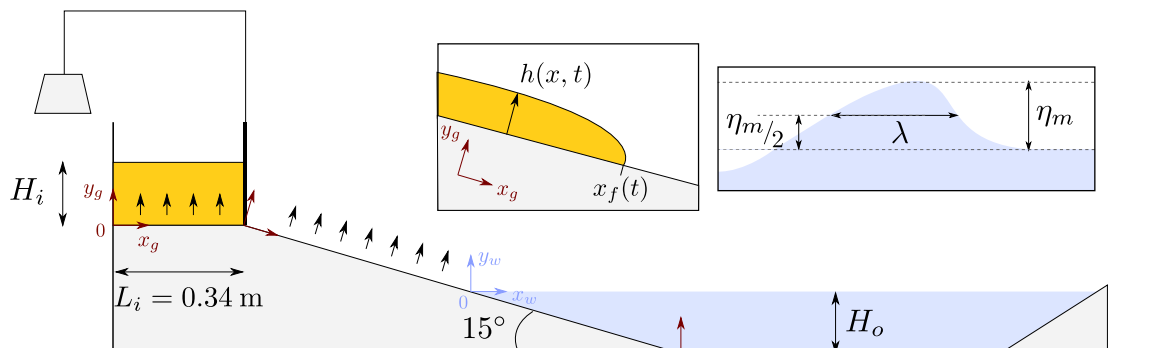


FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental avec les paramètres initiaux et les grandeurs macroscopiques de l'écoulement granulaire et de la vague générée. Les flèches noires représentent le flux d'air vertical permettant de fluidiser le matériau granulaire.

Le matériau granulaire utilisé dans cette étude correspond à des billes de verre quasi-monodisperses de diamètre $d = 65 \pm 10 \mu\text{m}$ et de masse volumique $\rho_p = 2550 \pm 50 \text{ kg.m}^{-3}$. La hauteur initiale de la colonne granulaire H_i dans le réservoir varie entre 10 cm et 41 cm, à 1 cm près. Afin d'étudier le rôle de la fluidisation du matériau granulaire dans le processus de génération de tsunamis, nous définissons trois configurations d'étude : (i) le milieu granulaire est fluidisé dans le réservoir et pendant sa propagation dans l'air, (ii) le milieu granulaire est uniquement fluidisé dans le réservoir et (iii) le milieu granulaire n'est pas fluidisé. Dans la suite, ces configurations respectives sont définies comme $\alpha = 100\%$, $\alpha = 24\%$ et $\alpha = 0\%$ où le paramètre α représente le rapport entre la longueur de fluidisation par rapport à la longueur maximale de fluidisation possible, soit $x_g \sim 1.4$ m. Le milieu granulaire est fluidisé à une vitesse de 4.5 mm.s^{-1} correspondant à la vitesse minimale de fluidisation pour laquelle le poids des grains est supporté par la pression de pore du fluide interstitiel en évitant cependant l'expansion du milieu granulaire ($\phi \sim 0.56 \pm 0.01$) et la formation de bulles d'air.

L'écoulement granulaire est caractérisé par le profil de hauteur $h(x, t)$ et l'évolution temporelle de la position du front x_f alors que la vague est décrite par l'élévation maximale de la hauteur d'eau η_m et la longueur d'onde λ à la demi-amplitude $\eta_m/2$ (voir figure 1). La dynamique est suivie par une méthode d'ombroscopie et enregistrée avec deux caméras Photron Fastcam, à une fréquence de 250 Hz et une résolution spatiale respective de de 4 mm et $800 \mu\text{m}$ par pixel.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Rôle de la fluidisation

Avant d'aborder l'influence de la fluidisation du matériau granulaire sur les caractéristiques de la vague générée, la dynamique de l'écoulement granulaire et la morphologie du dépôt final sont caractérisées dans le cas sec (c-à-d $H_o = 0$ cm) pour les trois configurations décrites dans la section 2.

La figure 2(a) montre l'évolution temporelle de la position du front $x_f - L_i$ pour les trois configurations de fluidisation, à savoir $\alpha = 100\%$ (ligne pleine), $\alpha = 24\%$ (ligne en tirets) et $\alpha = 0\%$ (ligne en

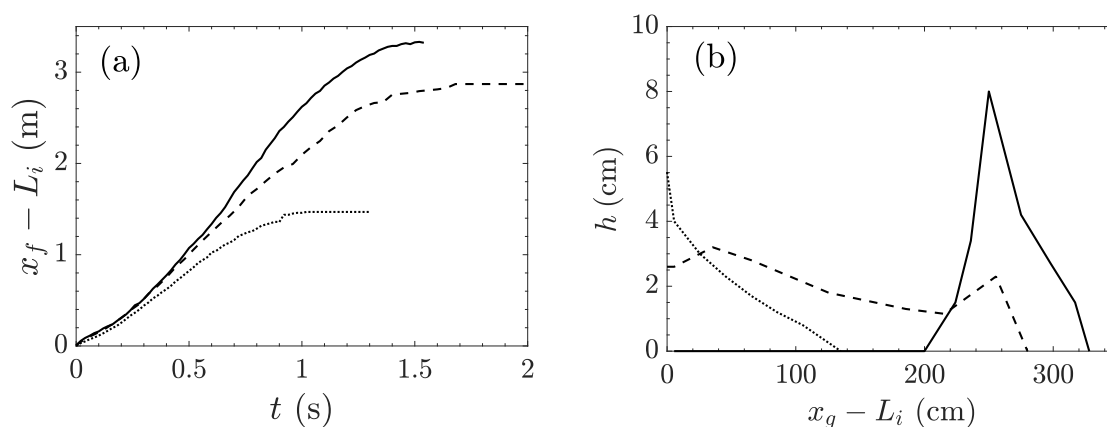


FIGURE 2 – (a) Évolution temporelle de la position du front $x_f - L_i$ et (b) morphologie du dépôt final pour un écoulement granulaire se propageant dans l’air : (—) $\alpha = 100\%$, (- - -) $\alpha = 24\%$ et (\cdots) $\alpha = 0\%$. La hauteur initiale de la colonne granulaire est $H_i = 20$ cm.

pointillés) dans le cas d’un écoulement granulaire se propageant dans l’air. À $t = 0$ s, la colonne initiale est libérée et l’écoulement granulaire accélère jusqu’à $t \sim 0.2$ s. Pendant cette phase d’accélération, il existe un léger retard entre le cas non fluidisé ($\alpha = 0\%$) et les cas fluidisés ($\alpha = 24\%$ et $\alpha = 100\%$). Puis, la position du front x_f évolue linéairement avec le temps, correspondant à une phase à vitesse constante. Cette phase est équivalente à celle obtenue dans le cas des écoulements de rupture de barrage sur un plan horizontal, appelée régime d’effondrement inertiel. En particulier, la vitesse du front suit la loi d’échelle $dx_f/dt \sim (gH_i)^{1/2}$, ne dépendant que de la hauteur initiale de la colonne [20]. Sur la figure 2(a), la vitesse du front dépend de la fluidisation avec, en particulier, dx_f/dt qui décroît avec α . Finalement, l’écoulement granulaire ralentit et s’arrête en formant un dépôt final. La distance d’arrêt est également affectée par la fluidisation du milieu granulaire. La longueur finale du dépôt est environ trois fois plus grande pour $\alpha = 100\%$ comparée au cas non fluidisé $\alpha = 0\%$. Cela confirme que les dissipations frictionnelles sont diminuées par le processus de fluidisation, permettant ainsi une vitesse et une distance de propagation plus importantes.

La figure 2(b) montre le profil de hauteur du dépôt final h en fonction de $x_g - L_i$ pour les trois configurations de fluidisation. Rappelons que le référentiel (x_g, y_g) défini pour le milieu granulaire suit la topographie du fond du canal. La morphologie du dépôt final est fortement influencée par la configuration de fluidisation considérée. Pour $\alpha = 0\%$ (ligne en pointillés), le dépôt est de forme triangulaire, en accord avec les observations de Mangeney et al. [21], et l’épaisseur décroît jusqu’à $x_g - L_i \sim 1.3$ m. Pour $\alpha = 24\%$ (ligne en tirets), la décroissance de l’épaisseur est plus faible, menant à une distance d’arrêt égale à $x_g - L_i \sim 2.8$ m. Finalement, pour $\alpha = 100\%$ (ligne pleine), la masse granulaire est pleinement mobilisée sur la pente et s’accumule à la transition entre le plan incliné et le fond horizontal du canal, à $x_g - L_i \sim 2.5$ m.

Ces résultats montrent que la fluidisation du milieu granulaire permet une augmentation de la vitesse de propagation de l’écoulement et une mobilisation plus importante de la masse initiale. L’influence de la fluidisation sur l’amplitude de la vague générée par l’impact d’un écoulement granulaire dans l’eau est maintenant abordée. La hauteur d’eau est égale à $H_o = 30$ cm, correspondant à un impact à $x_g - L_i \sim 1.4$ m.

La figure 3 montre l’amplitude de la vague η_m , mesurée à $x_w = 2.5$ m, en fonction du paramètre α .

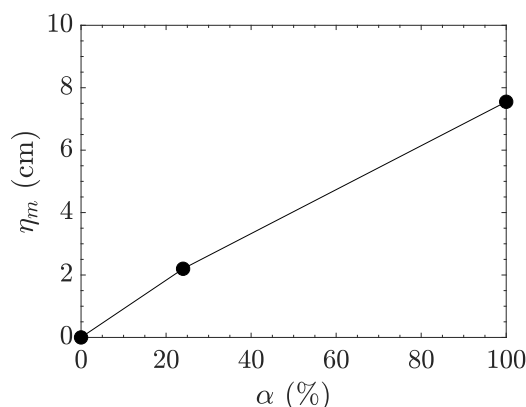


FIGURE 3 – Amplitude de la vague générée η_m mesurée à $x_w = 2.5$ m en fonction de α caractérisant la fluidisation du milieu granulaire. Les paramètres initiaux sont $H_i = 20$ cm et $H_o = 30$ cm.

L'amplitude η_m augmente avec α et varie de 0 cm à 8 cm. Dans le cas non fluidisé ($\alpha = 0\%$), l'écoulement granulaire s'arrête à l'entrée de l'eau et ne génère pas de vague. Pour $\alpha = 24\%$ et $\alpha = 100\%$, on observe une différence importante de l'amplitude de la vague qui met en évidence le rôle de la fluidisation. La différence d'amplitude observée entre ces deux configurations peut être attribuée à la vitesse de l'écoulement et/ou à la masse de grains impactant l'eau qui augmentent avec α . Actuellement, des travaux supplémentaires sont effectués afin de quantifier indépendamment l'influence de la vitesse d'impact et celle de la masse granulaire. La section suivante discute l'influence de la hauteur initiale de la colonne granulaire et celle de la hauteur d'eau, pour $\alpha = 100\%$.

3.2 Caractérisation de la vague générée

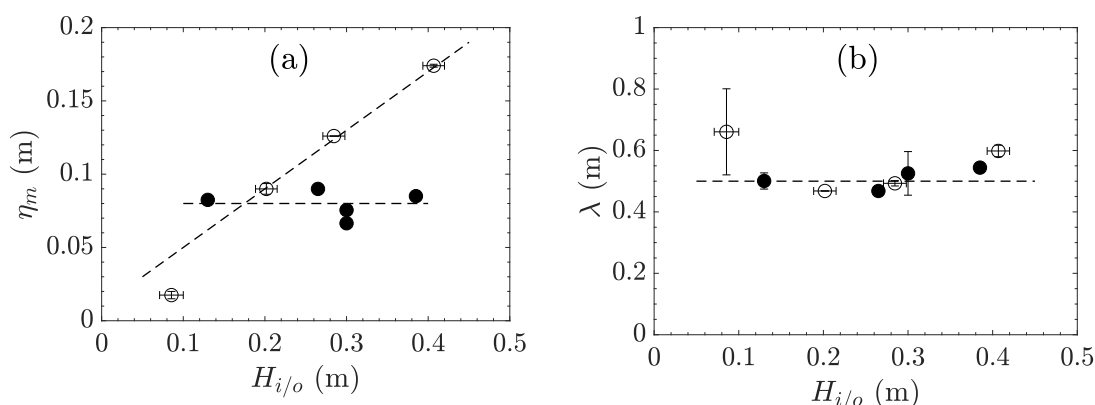


FIGURE 4 – (a) Amplitude η_m et (b) longueur d'onde λ de la vague en fonction de la hauteur initiale de la colonne granulaire H_i (cercles vides, hauteur d'eau constante avec $H_o = 26.5$ cm) et de la hauteur d'eau H_o (cercles pleins, hauteur initiale de la colonne granulaire constante avec $H_i = 20$ cm), à $x_w = 2.5$ m.

La figure 4 montre (a) l'amplitude η_m et (b) la longueur d'onde λ de la vague générée par l'impact de l'écoulement granulaire fluidisé dans l'eau en fonction de la hauteur initiale de la colonne granulaire H_i (cercles vides, $H_o = 26.5$ cm) et de la hauteur d'eau H_o (cercles pleins, $H_i = 20$ cm).

Tout d'abord, la hauteur d'eau H_o (cercles pleins) n'affecte ni l'amplitude η_m (figure 4(a)) ni la lon-

gueur d'onde λ (figure 4(b)) de la vague générée. Plus précisément, $\eta_m \sim 8$ cm et $\lambda \sim 0.5$ m pour une hauteur d'eau variée dans la gamme $H_o = [13.1 : 38.5]$ cm. Cette indépendance avec H_o suggère que le processus qui contrôle les caractéristiques de la vague intervient proche de la zone d'impact, et n'est pas affecté par la profondeur d'eau, pour $x_w = [0 : 2.5]$ m.

La hauteur initiale de la colonne granulaire H_i n'affecte pas la longueur d'onde λ , contrairement à l'amplitude η_m . Plus précisément, η_m est multipliée par un facteur 9 lorsque H_i est multipliée par un facteur 4. En fait, l'augmentation de H_i conduit à une augmentation de deux paramètres contrôlant les caractéristiques de la vague et déjà discutés dans la section 3.1 : (1) la masse définie comme $m = \phi H_i L_i W$, avec $W = 0.2$ m la largeur du réservoir, et (2) la vitesse d'écoulement $dx_f/dt \sim (gH_i \cos \theta)^{1/2}$. À partir des résultats actuels, il n'est pas possible de décorrélérer l'influence de la masse granulaire de celle de la vitesse d'impact. Toutefois, cette étude met en évidence le rôle majeur de la masse et/ou de la vitesse d'impact sur l'amplitude de la vague alors que sa longueur d'onde est indépendante de ces deux paramètres.

4 Conclusion

Dans cette étude, la génération de vagues de tsunami par un écoulement granulaire fluidisé est abordée expérimentalement. Le rôle de la fluidisation de l'écoulement granulaire est montré à partir de la dynamique de propagation du front et de la morphologie du dépôt final. En particulier, la fluidisation permet une augmentation de la vitesse de propagation et une mobilisation plus importante de la masse de grains par rapport au cas non fluidisé. Ces différences sont à l'origine d'une amplitude de vague plus importante dans le cas fluidisé. La dépendance de l'amplitude de la vague à la vitesse d'impact et/ou à la masse est également confirmée en variant la hauteur initiale de la colonne granulaire, alors que la longueur d'onde de la vague n'est pas affectée. Finalement, nous mettons en évidence que la hauteur d'eau n'influence pas les caractéristiques de la vague dans cette configuration à faible pente. Ceci suggère que le processus qui contrôle les caractéristiques de la vague intervient essentiellement à la zone d'impact.

Références

- [1] Harbitz, C. B., Løvholt, F., Pedersen, G. & Masson, D. G. Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides : a short review (2006), *Nor. J. Geol.*, **86** : 255–264.
- [2] Paris, R. Mechanisms of volcanic tsunamis (2015), *Phil. Trans. R. Soc. A*, **373** : 20140380.
- [3] Wadge, G., Robertson, R. E. A. & Voight, B. The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat from 2000 to 2010 (2014), *London : Geol. Soc*, **39**.
- [4] Self, S. & Rampino, M. R. The 1883 eruption of Krakatau (1981), *Nature*, **294** : 697–704.
- [5] Siebert, L. Glicken, H. & Tadahide, U. Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions, *Bull. Volcanol.*, **49** : 435–459.
- [6] Wiegel, R. L. Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body (1955), *Eos. Trans. AGU*, **36** : 759–774.
- [7] Law, L. & Brebner, A. On water waves generated by landslides (1968), in *Proceedings of the Third Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics*, Sydney, Australia, 155–159.
- [8] Kamphuis, J. & Bowering, R. Impulse waves generated by landslides (1972), in *Proceedings of 12th ICCE*, Vancouver, Canada, 575–588.

- [9] Walder, J., Watts, P., Sorensen, O. & Janssen, K. Tsunamis generated by subaerial mass flows (2003), *J. geophys. Res.*, **108** : 1–19.
- [10] Enet, F. & Grilli, S. T. Experimental study of tsunami generation by three-dimensional rigid underwater landslides (2007), *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, **133** : 442–454.
- [11] Ataie-Ashtiani, B. & Najafi-Jilani, A. Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide (2008), *Coast. Eng. J.*, **55** : 989–1004.
- [12] Ataie-Ashtiani, B. & Nik-Khah, A. Impulsive waves caused by subaerial landslides (2008), *Environ. Fluid Mech.*, **8** : 263–280.
- [13] Heller, V. & Spinneken, J. Improved landslide-tsunami prediction : Effects of block model parameters and slide model (2013), *J. Geophys. Res.*, **118** : 1489–1507.
- [14] Fritz, H. M., Hager, W. H. & Minor, H.-E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves (2004), *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, **130** : 287–302.
- [15] Mohammed, F. & Fritz, H. M. Physical modelling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides (2012), *J. Geophys. Res.*, **117** : C11015.
- [16] Viroulet, S., Sauret, A. & Kimmoun, O. Tsunami generated by a granular collapse down a rough inclined plane (2014), *EPL*, **105** : 34004.
- [17] Robbe-Saule, M., Morize, C. Bertho, Y., Sauret, A. & Gondret, P. Experimental study of wave generation by a granular collapse (2017), in *Proceedings of 8th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, Montpellier, France, **140** : 14007.
- [18] Zitti, G., Ancey, C., Postacchini, M. & Brocchini, M. Impulse waves generated by snow avalanches : Momentum and energy transfer to a water body (2016), *J. Geophys. Res.*, **121** : 2399–2423.
- [19] Roche, O., Gilbertson, M. A., Phillips, J. C. & Sparks, R. S. J. Experimental study of gas-fluidized granular flows with implications for pyroclastic flow emplacement (2004), *J. Geophys. Res.*, **109** : B10201.
- [20] Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y. & Tamburrino, A. Experimental observations of water-like behavior of initially fluidized, dam break granular flows and their relevance for the propagation of ash-rich pyroclastic flows (2008), *J. Geophys. Res.*, **113** : B12.
- [21] Mangeney, A., Roche, O., Hungr, O., Mangold, N., Faccanoni, G. & Lucas, A. Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds (2010), *J. Geophys. Res.*, **115** : F03040.