

# Effondrement de châteaux de sable dans l'eau : des tsunamis de laboratoire

Wladimir Sarlin, Cyprien Morize, Alban Sauret et Philippe Gondret (gondret@fast.u-psud.fr)

Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques (UMR 7608 CNRS et Université Paris-Saclay).  
Laboratoire FAST, Bâtiment Pascal (bât 530), Rue André Rivière, 91405 Orsay Cedex

Les tsunamis générés par des glissements de terrains ou la chute de pans de montagnes dans les océans, lacs ou fleuves, peuvent être particulièrement destructeurs et meurtriers pour les côtes avoisinantes.

Ces événements ont été dernièrement reproduits en laboratoire, dans une configuration modèle semblable à celle d'un château de sable s'écroulant dans l'eau sous l'effet de la gravité.

En l'an 563, un tsunami dévaste les villages sur les rives du lac Léman en faisant de nombreuses victimes [1]. Cet événement dévastateur, qui a frappé les esprits au Moyen Âge, a été notamment relaté par l'évêque Grégoire de Tours dans son *Histoire des Francs*. Quelle a bien pu être la raison de ce déchainement d'eaux lacustres plutôt calmes habituellement ? C'est l'écroulement d'un pan entier de montagne à l'embouchure orientale du Rhône qui a provoqué une importante vague chenalisée, dévastant alors dans sa propagation tout le pourtour du lac jusqu'à son extrémité occidentale vers Genève, avec une puissance proche de celle du tsunami de Fukushima (2011).

Plus récemment, le volcan Anak Krakatau en Indonésie, fils du volcan Krakatau qui s'était effondré en 1883 lors d'un événement cataclysmique à l'origine du célèbre tableau de Munch « Le Cri » (1888), s'effondre à son tour partiellement dans la soirée du 22 décembre 2018, faisant plusieurs centaines de victimes dans les îles voisines. Cet événement avait été annoncé dès 2012 par une équipe française de géologues du Laboratoire

Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand [2], avec un volume prévisionnel de  $0,28 \text{ km}^3$ , très proche du volume réellement tombé ( $0,27 \text{ km}^3$ ) [3].

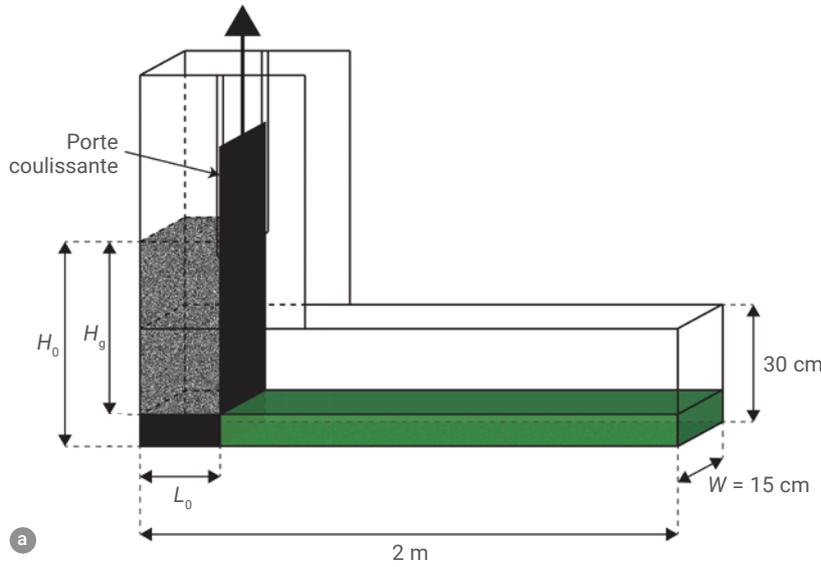
De nombreux effondrements d'îles volcaniques ayant eu lieu dans le dernier million d'années ont été recensés grâce à des relevés bathymétriques (mesures des profondeurs marines) des fonds océaniques, et d'autres effondrements auront lieu dans un futur plus ou moins proche. Par exemple, selon certaines prévisions alarmistes, un flan entier de montagne d'une île des Canaries (Cumbre Nueva, La Palma) pourrait s'effondrer avec un volume possible de l'ordre de  $30 \text{ km}^3$ , cent fois plus important que celui de l'Anak Krakatau, qui pourrait générer une vague de plusieurs centaines de mètres de haut avec des risques potentiels jusque sur les côtes de Floride selon des premières simulations [4]. Comment expliquer de telles vagues ? Quelles en sont les caractéristiques ?

C'est en partie pour tenter de répondre à cette question que nous nous sommes lancés il y a quelques années dans la réalisation d'un

dispositif de laboratoire pour reproduire l'essence même de ces événements géologiques — un effondrement gravitaire, initialement subaérien, dans l'eau — et observer l'onde associée [5].

## Le dispositif expérimental

Notre dispositif (fig. 1) consiste en un canal de 2 m de long et 15 cm de large avec, au fond, une couche d'eau de hauteur  $h_0$ . Une colonne de grains — des billes de silice de quelques mm de diamètre, comparables à du sable très grossier ou à des gravillons — est installée à une extrémité du canal et maintenue en place par une porte verticale. À l'ouverture rapide de la porte, la colonne s'effondre par gravité. Le front de grains qui tombent dans l'eau génère un bourrelet d'eau ; ce dernier grandit, puis se propage le long du canal en se détachant du front de grains qui ralentit. Le phénomène est filmé par une caméra, l'eau ayant été teintée de fluorescéine pour augmenter le contraste visuel. Un traitement d'images nous permet alors d'accéder à la déformation de la surface de l'eau et à l'avancée du front de grains à tout instant.



**1. L'expérience.**

(a) À gauche : schéma du dispositif expérimental.

(b) À droite : images des trois régimes d'ondes observées pour différentes hauteurs d'eau et différents nombres de Froude  $Fr_f$ . De haut en bas : Mascaret (M) pour  $h_0 = 4$  cm et  $Fr_f = 1,4$  ; onde solitaire (S) pour  $h_0 = 8$  cm et  $Fr_f = 0,65$  ; et onde de Cauchy-Poisson (CP) pour  $h_0 = 25$  cm et  $Fr_f = 0,2$ . En vert, l'eau ; en gris, les billes de silice.

**Trois régimes d'ondes**

En variant le volume  $V$  de la colonne de grains et son rapport d'aspect  $a$  correspondant au rapport de sa hauteur  $H_0$  à sa largeur  $L_0$ , ainsi que la hauteur d'eau  $h_0$ , nous avons pu mettre en évidence trois régimes d'ondes selon la gamme du nombre de Froude local,  $Fr_f$ , caractérisant l'avancée du front de grains dans l'eau [6]. Ce nombre sans dimension, important pour les écoulements gravitaires à surface libre, correspond ici au rapport de la vitesse maximale  $v_f$  d'avancée horizontale du front de grains à la vitesse typique  $(gh_0)^{1/2}$  des ondes de gravité en eau peu profonde, c'est-à-dire de profondeur faible devant la longueur d'onde.

Selon les dimensions initiales de la colonne de grains et la hauteur d'eau, l'effondrement n'est pas le même et le nombre de Froude résultant non plus. Lorsque la valeur de  $Fr_f$  est importante ( $Fr_f > 1$ ), ce qui correspond à des grandes colonnes et des faibles profondeurs d'eau, le front de grains pousse l'eau comme un piston sur une grande distance et il se forme alors un

*mascaret*, avec un front d'onde se raidissant tel une onde de choc hydraulique jusqu'au déferlement de la vague (fig. 1b-M). Ce mascaret, que l'on rencontre aussi dans la situation d'un courant de marée remontant un fleuve comme la Dordogne, est la version propagative du ressaut hydraulique que chacun peut observer dans le fond de son évier au voisinage de l'impact du jet d'eau tombant du robinet.

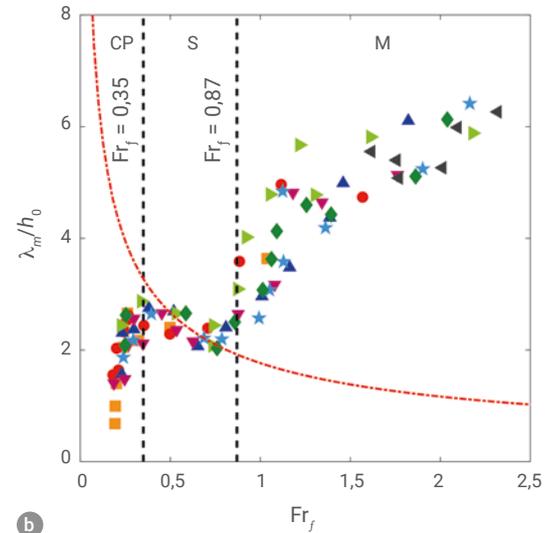
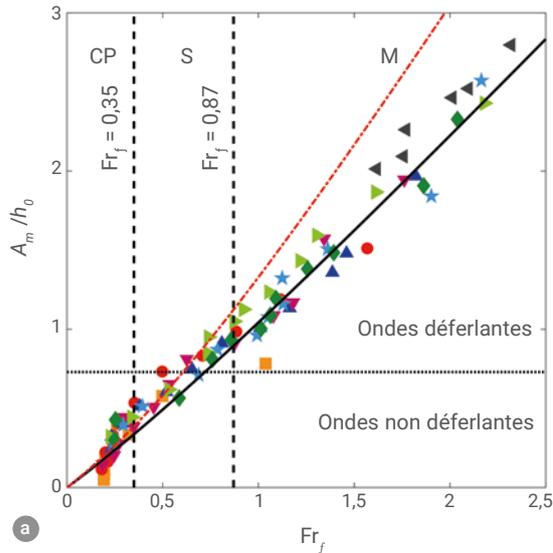
Lorsque la valeur du nombre  $Fr_f$  est modérée ( $0,4 < Fr_f < 0,9$ ), le bourrelet d'eau, créé par l'avancée du front de grains dans un mouvement de piston, se détache de ce dernier en adoptant la forme caractéristique d'une onde solitaire bien symétrique (fig. 1b-S et encadré, p. 26).

Enfin, lorsque le nombre  $Fr_f$  est suffisamment faible ( $Fr_f < 0,3$ ), ce qui correspond à des petites colonnes et des grandes profondeurs d'eau, il se forme une onde dite de Cauchy-Poisson (fig. 1b-CP), spécifique des vagues engendrées par une perturbation impulsionnelle comme celle d'un caillou tombant dans l'eau, et qui se caractérise par un train d'onde dispersif derrière un front asymétrique.

“ Selon les dimensions initiales de la colonne de grains et la hauteur d'eau, l'effondrement n'est pas le même. ”

En nous inspirant des théories hydrodynamiques spécifiques aux eaux peu profondes, et en assimilant le mouvement du front de grains à celui d'un piston, nous avons pu relier l'amplitude relative maximale de l'onde,  $A_m/h_0$ , au nombre de Froude  $Fr_f$ . Les courbes correspondantes apparaissent en traits respectivement noir et rouge sur la figure 2a et rendent bien compte de l'augmentation faiblement non linéaire de  $A_m/h_0$  avec  $Fr_f$  dans chacun des deux régimes correspondants, mascarets (M) et ondes solitaires (S). Les ondes déferlent lorsque leur amplitude relative excède la valeur critique  $A_m/h_0 \approx 0,8$ . La distinction entre les trois régimes d'ondes apparaît particulièrement bien dans le tracé de la longueur d'onde relative  $\lambda_m/h_0$  correspondante en fonction de  $Fr_f$  (fig. 2b), avec la cassure dans la courbe reflétant la propriété singulière des ondes solitaires, dont la longueur est d'autant plus faible que leur amplitude est grande (voir encadré, p. 26).

>>>



## 2. Caractéristiques de l'onde générée en fonction du nombre de Froude $Fr_f$ .

(a) Amplitude relative maximale  $A_m/h_0$ . (b) Longueur d'onde relative  $\lambda_m/h_0$ .

Les symboles correspondent aux résultats expérimentaux, tandis que les courbes correspondent aux théories hydrodynamiques non linéaires en eau peu profonde pour les ondes solitaires (en rouge) et les mascarets (en noir).

>>>

### D'un modèle explicatif à un modèle prédictif

La modélisation précédente permet de relier l'amplitude de l'onde générée à la dynamique observée de l'effondrement dans l'eau. Nous avons souhaité aller plus loin, en reliant l'amplitude de l'onde à la géométrie initiale de la colonne avant qu'elle ne s'effondre. Pour cela, nous avons dû

mieux comprendre la dynamique de l'effondrement gravitaire d'une colonne de grains. Nous avons pu montrer qu'elle se faisait selon une accélération réduite de l'ordre de  $g/2$ , suivie d'un étalement horizontal  $\Delta l$  avec une accélération encore un peu plus réduite par la friction [7]. La vitesse typique d'avancée du front de grains  $v_f$  est donc proportionnelle à

$(g\Delta l)^{1/2}$ . On peut alors en déduire que le nombre de Froude  $Fr_f$  correspondant à cet étalement dans une hauteur d'eau  $h_0$  sera proportionnel à  $(\Delta l/h_0)^{1/2}$ . Compte tenu de la dépendance faiblement non linéaire de l'amplitude relative de la vague  $A_m/h_0$  vis-à-vis de  $Fr_f$ , on comprend que l'amplitude de la vague générée  $A_m$  doit être proportionnelle à  $(h_0\Delta l)^{1/2}$ . La figure 3 montre le résultat de ces prédictions comparées aux mesures expérimentales de l'amplitude  $A_m$  de l'onde générée en fonction de la profondeur d'eau  $h_0$  pour différentes hauteurs initiales de colonnes. Quelle que soit la colonne de grains, l'amplitude de l'onde croît aux faibles profondeurs (car l'étalement des grains  $\Delta l$  ne varie pas beaucoup), atteint un maximum puis décroît lorsque la profondeur d'eau devient plus grande (car  $\Delta l$  diminue plus vite que  $h_0$  augmente), avant de devenir presque constante. Les deux premières évolutions correspondent aux deux régimes d'eau peu profonde, mascarets et ondes solitaires, décrits précédemment, tandis que le dernier régime plateau correspond aux ondes de Cauchy-Poisson en eau profonde. L'étalement  $\Delta l$  étant par ailleurs quasi proportionnel à la hauteur de la colonne, on comprend également que l'amplitude de la vague générée est d'autant plus grande que la colonne est haute.

## JOHN SCOTT RUSSELL ET LES ONDES SOLITAIRES

De la découverte (1834) à la reproduction (1844) puis à la théorie (1877-1895)

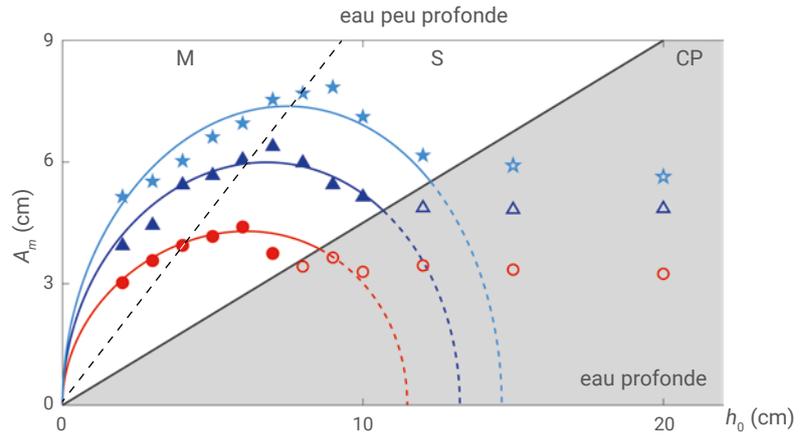
En 1834, à l'occasion d'une promenade à cheval le long du canal de l'Union reliant Edimbourg à Forth-Clyde en Écosse, John Scott Russel constate avec étonnement que le bourrelet d'eau initialement poussé par l'avant d'une barge s'en détache suite à l'arrêt brusque de la barge, pour continuer sa route pendant plusieurs kilomètres sans se déformer ni s'atténuer. C'est la première observation relatée d'onde solitaire, que cet ingénieur écossais s'emploiera à reproduire lui-même les années suivantes par le lâché vertical d'un bloc solide à l'extrémité d'un petit canal (1844). Ce phénomène sera également reproduit en 1855 en France, dans le canal de Bourgogne, par Henry Darcy et Henry Bazin, deux ingénieurs polytechniciens du corps des Ponts et Chaussées. Deux mathématiciens néerlandais, Dieterik Korteweg et Gustav de Vries étudient en 1895 l'équation non linéaire qui porte maintenant leurs noms et dont les ondes solitaires ou *solitons* sont les solutions. Cette équation, qui avait été abordée par Joseph Boussinesq dès 1877, est valable dans les situations d'eau peu profonde pour lesquelles la profondeur d'eau est faible devant la longueur d'onde ; la forme singulière des solitons résulte d'une situation d'équilibre entre effets non linéaires qui tendent à raidir le front d'onde et effets dispersifs qui tendent au contraire à l'adoucir en favorisant un comportement oscillatoire. Ce type d'onde spécifique, dont la longueur est d'autant plus faible que l'amplitude est grande, a depuis été observé dans d'autres domaines de la physique, comme en optique ou en électricité.

### Vers une reconstitution des « paléo-tsunamis » ?

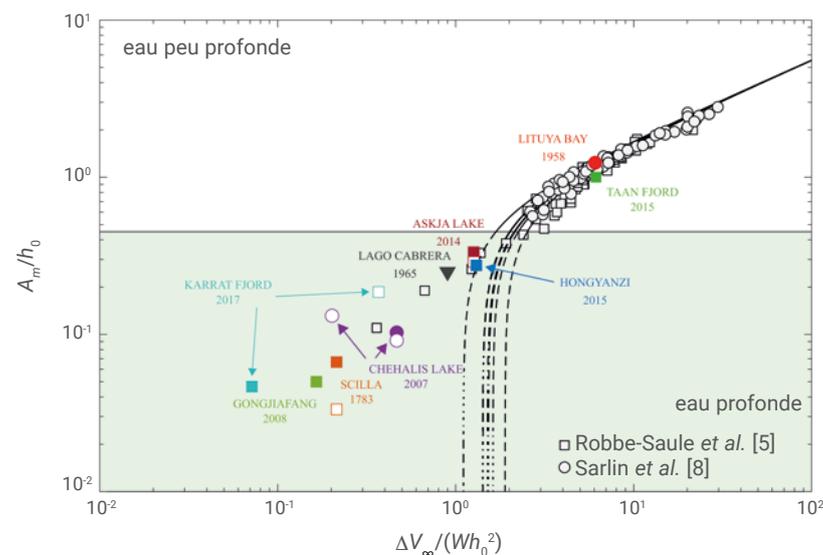
L'intérêt du modèle complet que nous avons développé [8] est qu'il permet de prédire l'amplitude de la vague générée par l'effondrement dans l'eau d'une colonne de grains donnée. Mais il permet également de déterminer l'amplitude de l'onde générée par un volume de grains rentrés dans l'eau par effondrement gravitaire, car cette amplitude dépend très peu de la géométrie initiale de l'effondrement, comme le montre la figure 4. Cela ouvre la voie à la possibilité d'estimer *a posteriori* l'amplitude de l'onde qui fut générée par un effondrement, par le relevé *post mortem* du dépôt sous-marin au moyen de techniques bathymétriques [5]. La figure 4 montre le bon accord des résultats de nos expériences de laboratoire et du modèle avec des estimations issues de cas géophysiques en situations d'eau peu profonde où l'amplitude relative de l'onde est importante, comme le célèbre évènement de 1958 à Lituya Bay en Alaska (USA). La plupart des cas géophysiques correspondent cependant à des situations d'eau profonde où l'amplitude relative est heureusement plus faible, avec une dispersion conséquente de l'onde. Il reste donc à étendre notre modèle actuellement

seulement valable en eau peu profonde, aux situations pour lesquelles la profondeur d'eau devient importante.

Il faut aussi noter que ces travaux concernent des effondrements subaériens, c'est-à-dire de matière initialement émergée qui tombe dans l'eau avec des mécanismes de générations plus intenses que les effondrements sous-marins qui peuvent survenir, comme lors du tsunami de Nice en 1979 provoqué par l'avalanche sous-marine due aux travaux d'extension de l'aéroport. ■



3. Amplitude maximale  $A_m$  de l'onde générée en fonction de la hauteur d'eau  $h_0$  pour trois colonnes granulaires de même largeur ( $L_0 = 10$  cm), mais de hauteurs différentes :  $H_0 = 19$  cm (o), 29 cm (Δ) et 39 cm (☆). Les symboles correspondent aux résultats expérimentaux et les traits aux prédictions de notre modèle. La zone grise et les symboles vides correspondent aux situations d'eau profonde où le modèle n'est plus valable.



4. Amplitude maximale relative  $A_m/h_0$  de l'onde générée en fonction du volume relatif  $\Delta V_\infty/Wh_0^2$  de grains tombés dans l'eau. Les symboles blancs correspondent aux résultats de toutes nos expériences de laboratoire, tandis que les symboles de couleur se réfèrent aux estimations de cas historiques. Les courbes en traits pleins correspondent à la prédiction en eau peu profonde pour différents rapports d'aspect de colonnes granulaires, allant d'environ 1 à 8 (de gauche à droite). La zone vert pâle représente à la situation d'eau profonde, où les prédictions (en tirets) ne sont plus valables.

- 1• P. Barthélémy, « Des chercheurs reconstituent le tsunami du lac Léman de l'an 563 », *Passeur de sciences* (28 octobre 2012).  
S. Bailly, « L'origine du tsunami du lac Léman de l'an 563 », *Pour la science* (13 novembre 2012).  
M. Vidard, « Le tsunami du lac Léman », *L'Édito carré, France Inter*, 8 avril 2010.
- 2• T. Giachetti *et al.*, "Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau volcano, Sunda Strait, Indonesia", *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* **361** (2012) 79-90.
- 3• S. T. Grilli *et al.*, "Modelling of the tsunami from the december 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits", *Indones. Scientific Reports* **9** (2019) 11946.
- 4• S. M. Abadie *et al.*, "Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands): tsunami source and near field effects", *Journal of Geophysical Research Oceans* **117** (2012) C5.
- 5• M. Robbe-Saule *et al.*, "Tsunamis generated by granular landslides: from the lab to real events", *Scientific Reports* **11** (2021) 18437.
- 6• W. Sarlin *et al.*, "Nonlinear regimes of tsunami waves generated by a granular collapse", *Journal of Fluid Mechanics* **919**, R6 (2021)
- 7• W. Sarlin *et al.*, "Collapse dynamics of dry granular columns: From free-fall to quasistatic flow", *Physical Review E* **104** (2021) 064904.
- 8• W. Sarlin *et al.*, "From granular collapses to shallow water waves: A predictive model for tsunami generation", *Physical Review Fluids* **7** (2022) 094801.