



HAL
open science

Forme des ressauts granulaires en canal incliné: implications possibles pour le dimensionnement des digues paravalanches

Thierry Faug, Philippa Childs, Edward Wyburn, Luiza Cardoso Ribas E
Castro, Itai Einav

► To cite this version:

Thierry Faug, Philippa Childs, Edward Wyburn, Luiza Cardoso Ribas E Castro, Itai Einav. Forme des ressauts granulaires en canal incliné: implications possibles pour le dimensionnement des digues paravalanches. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03444736

HAL Id: hal-03444736

<https://hal.science/hal-03444736>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Forme des ressauts granulaires en canal incliné: implications possibles pour le dimensionnement des digues paravalanches

T. FAUG^{a,b}, P. CHILDS^b, E. WYBURN^b, L. CASTRO^b, I. EINAV^b

a. Irstea UR ETGR - Univ. Grenoble-Alpes, F-38402 St Martin d'Hères, France

thierry.faug@irstea.fr

b. School of Civil Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australia

itai.einav@sydney.edu.au

Résumé :

Quand un écoulement granulaire à surface libre en régime supercritique rencontre un mur normal à la direction de l'écoulement, il peut se former une discontinuité en hauteur et en vitesse, dit ressaut granulaire par analogie aux ressauts hydrauliques, se propageant vers l'amont. Pour cela, il faut que la hauteur de l'obstacle soit supérieure à une hauteur critique conduisant à la formation du ressaut qui marque la transition entre le régime supercritique et le régime subcritique. En dessous de cette hauteur critique, l'écoulement reste supercritique et déborde sans formation de ressaut. Au-dessus de la hauteur critique, si le ressaut formé est de hauteur inférieure à la hauteur critique alors le ressaut se propage vers l'amont sans débordement de l'obstacle. Si le ressaut est de hauteur supérieure à la hauteur critique du mur alors ce dernier est débordé par l'écoulement. Ces processus, associés à la hauteur critique de l'obstacle pour qu'il y ait formation d'un ressaut d'une part et à la hauteur du ressaut formé d'autre part, constituent aujourd'hui les bases des recommandations Européennes en matière de dimensionnement des digues paravalanches d'arrêt visant à stopper entièrement l'écoulement d'avalanche ainsi que des digues de déviation [1]. Les valeurs de hauteur critique de l'obstacle et de hauteur du ressaut sont calculées à partir des équations traditionnelles des ressauts hydrauliques et sont essentiellement fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Plusieurs études (voir par exemple [2,3,4]) ont démontré que ces équations classiques de l'hydraulique offraient de bonnes prédictions pour les ressauts, normaux ou obliques, formés dans les écoulements granulaires, ces derniers étant de bons modèles pour les écoulements de neige. Cependant la plupart des expériences de laboratoire sont restées jusqu'à présent limitées à des pentes fortes où l'inertie est dominante (nombre de Froude de l'ordre de 5-15), ce qui reste des valeurs élevées par rapport aux valeurs du nombre de Froude généralement plus faibles (de l'ordre de l'unité ou de quelques unités) dans la zone d'arrêt des avalanches. Des questions viennent alors à l'esprit : que se passe-t-il aux faibles valeurs du nombre de Froude pour lesquelles les forces d'inertie dans le ressaut ne sont pas dominantes ? Quel sont les effets des fortes de gravité et de frottement dans le ressaut ? Les équations classiques de l'hydraulique sont-elles toujours valides ?

Afin de progresser sur ces questions, nous avons étudié en détail les ressauts stationnaires formés dans les écoulements granulaires en pente. Nous avons développé un nouveau dispositif expérimental qui permet de générer des ressauts granulaires stationnaires. Une vanne placée à la sortie d'un canal incliné à fond lisse permet d'obstruer en partie les écoulements granulaires permanents formés dans

le canal et de générer des ressauts se propageant vers l'amont. En ajustant le débit de sortie au débit entrant, il est possible de rendre le ressaut stationnaire dans une large gamme de pente et débit. Des mesures basées sur des techniques d'imagerie (détection de surface libre, analyse de diagrammes spatio-temporels obtenus à la base de l'écoulement, aux parois et à la surface libre à l'aide d'une caméra rapide) couplées à des mesures de débit massique nous ont permis de mesurer en détail la dynamique des écoulements incidents (hauteur, vitesse, masse volumique) et la forme des ressauts pour chaque type d'écoulement.

Nous avons pu établir un diagramme de phase qui permet de mettre en évidence une riche variété de ressauts granulaires. A haut débit, les écoulements sont denses et la forme des ressauts granulaires varie largement avec la pente. Au-delà d'une certaine pente, les écoulements sont légèrement non uniformes (uniformément accélérés) et les ressauts sont très raides avec une zone de recirculation au pied du ressaut. Pour une large gamme de pente, les écoulements sont uniformes, la zone de recirculation dans le ressaut disparaît et les ressauts sont de plus en plus diffus quand la pente diminue. A une pente critique égale à l'angle de frottement typique du matériau, il est impossible de former un ressaut. Cette première série de tests à haut débit met en évidence une transition entre ressauts raides avec recirculation et ressauts diffus. Les ressauts diffus ont des hauteurs plus grandes que la hauteur prédite par l'hydraulique alors que la hauteur des ressauts raides avec recirculation est bien prédite par l'hydraulique classique. Nous montrons qu'une équation de ressaut avec prise en compte du poids du ressaut dans la direction de l'écoulement diminué de la force de frottement dans le ressaut (comme initialement proposé par [5] et récemment revisité par [6]) permet d'expliquer l'écart observé entre l'hydraulique classique et les ressauts granulaires diffus, dits ressauts frictionnels, à bas nombre de Froude typiquement en dessous de 4 dans nos tests. A faible débit, les écoulements incidents sont plus dilués et génèrent des ressauts dits compressibles pour lesquels il existe, en plus de la discontinuité en hauteur et en vitesse, une variation non négligeable de la masse volumique à travers le ressaut. Nous proposons une équation qui prend en compte cette variation de masse volumique. Cette équation est ainsi capable de prédire la diminution de la hauteur des ressauts quand les écoulements incidents sont de plus en plus dilués du fait de la diminution du débit entrant (à pente constante).

Notre étude expérimentale de laboratoire couplée à des solutions analytiques a permis de mettre en évidence (i) une première transition entre ressauts granulaires raides avec recirculation et ressauts granulaires diffus frictionnels et (ii) une seconde transition entre ressauts granulaires incompressibles et compressibles. Les effets des termes source dans l'équation de ressaut (poids, force de frottement) à faible nombre de Froude et de la variation de masse volumique pour les écoulements dilués mis en évidence pour les ressauts stationnaires sont susceptibles de se manifester aussi dans les ressauts instationnaires. Cela peut remettre en question les recommandations Européennes existantes en matière de dimensionnement des digues paravalanches, notamment quand le nombre de Froude est faible (typiquement inférieur à 4 dans nos tests). Notre étude montre que les ressauts frictionnels diffus ont une hauteur plus grande que la hauteur prédite par l'équation de l'hydraulique alors que les ressauts compressibles ont une hauteur plus faible. Si le dernier résultat va dans le sens de la sécurité, le premier résultat est lui plus problématique quant au dimensionnement actuel des digues et au risque de débordement en aval des digues. En effet, nos résultats suggèrent que la hauteur des ressauts, donc la hauteur de digue nécessaire, peut être sous-estimée dans les régimes d'écoulement à bas nombre de Froude si l'équation de l'hydraulique (sans les termes source) est utilisée.

Abstract :

When a supercritical free-surface granular flow meets a wall normal to the flow direction, a discontinuity in depth and velocity, namely a granular jump in analogy to hydraulic jumps, can propagate upstream of the wall. That pattern occurs when the wall height is greater than a critical height for which a jump can be formed. The jump corresponds to the transition between supercritical and subcritical regimes. Below the critical height, the flow remains supercritical and can overflow the wall without any jump formed. Above the critical height, and if the jump height is larger than the critical height of the wall, the jump may propagate upstream without any overflow downstream of the wall. If the jump height is larger than the wall height, the wall is overflowed. Those processes, associated with the critical height of the obstacle above which a jump can be formed on the one side, and the jump height on the other side, are the pillars of the European guidelines for the design of avalanche protection (either catching or deflecting) [1]. The values of both the critical height of the wall and the jump height are derived from the traditional shallow-water shock theory and essentially depend on the Froude number of the incoming flow. Several studies (see for instance [2,3,4]) have shown that the traditional hydraulic equations were suitable for jumps, either normal or oblique, formed in flows of granular materials, which are good models for snow flows. However, most of the tests were made on steep slopes for which inertia prevailed. The Froude number was typically in the range 5-15, which corresponded to high values compared to values of the Froude numbers usually lower (close to unity or a few unities only) in the run-out zones of avalanches. Some questions may then arise: what would happen at lower values of the Froude number leading to granular jumps inside which inertia does not prevail? What would be the effects of gravity and friction forces acting within the jump? Are the traditional equations from hydraulics still valid?

In order to make some progress on the above-mentioned questions, we have analyzed in detail the standing jumps formed in granular flows down an incline. We have developed a new laboratory device that allows us to generate steady granular jumps. A gate, placed at the exit of a chute, allows us to obstruct partially the steady granular flows formed in the smooth-based chute and to produce jumps propagating upstream of the gate. By matching the outgoing mass discharge (at the end of the chute) with the input mass discharge (at the entry of the chute), it is possible to make the jumps stationary over a wide range of both slope angle and mass discharge. Image processing techniques (detection of the flow free-surface, analysis of time-space plots obtained at the bottom, the sidewalls and the free surface of the flows with the help of a high-speed video camera) coupled with mass discharge measurements allowed us to quantify in detail the dynamics of the incoming flows (thickness, velocity, density) and the shape of the standing jumps for each incoming flow-type.

We have been able to establish a phase-diagram that allowed us to evidence a rich variety of granular jumps. At high mass discharge, the incoming flows are dense and the shape of jumps varies greatly as a function of the slope angle. Beyond a given slope, the flows are slightly non uniform (accelerated) and the jumps are very steep with a recirculation zone at the foot of the jump. For a relatively wide range of slope angle, the flows are uniform, the recirculation zone disappears and the jumps are more and more diffuse while the slope angle is decreased. At a critical slope angle close to the typical bulk friction angle of the granular material, it is no longer possible to form any stationary jump. That first series of tests at high mass discharge reveals a transition between steep jumps with recirculation and diffuse jumps. The height of diffuse jumps is higher than the height predicted by the traditional hydraulic equation while the height of steep jumps with recirculation is well predicted by hydraulics. We show that a full jump equation accounting for the weight of the jump in the flow direction reduced by the friction force within the jump (as early proposed by [5] and recently revisited and extended by [6]) is helpful to explain the gap between the traditional hydraulic equation and the measurements

made on diffuse granular jumps, namely frictional jumps, at low Froude numbers typically below 4 from our tests. At low mass discharge, the incoming flows are more dilute and can produce jumps that are compressible because the variation of density across the jumps becomes important. We propose an equation accounting for the density change across the jump. That equation is able to predict the decrease of jump height when the incoming flows become more and more dilute while decreasing the mass discharge (at constant slope angle).

Our laboratory study coupled with some analytical solutions revealed (i) a first transition between steep granular jumps with a recirculation zone and diffuse frictional granular jumps and (ii) a second transition between compressible and incompressible jumps. The effects of source terms in the jump equation (weight, friction force) at low Froude number and the density variation across the jump for dilute flows were evidenced for standing jumps. Those effects are very likely to also act in propagating jumps, namely bores, which may question the current European guidelines regarding the design of avalanche protection dams, below a typical value of the Froude number (equal to 4 in our tests). Our study shows that the height of diffuse frictional jumps is larger than the height predicted by hydraulics while compressible jumps are thinner than incompressible jumps. The latter result is safe but the former result is more questionable regarding the current dam design and the residual risk associated with possible overflow downstream of the dam. Our results suggest that the jump height, and consequently the required height of the dam, may be underestimated in avalanche-flow regimes at low Froude number if the hydraulic equation (without any source terms) is used.

Mots clefs : Ecoulement granulaire, Ressaut, Avalanche, Digue paravalanche

Remerciements

Thierry Faug remercie le financement du projet de recherche par la Commission Européenne : Marie Curie International Outgoing Fellowship (FP7-PEOPLE-2013-IOF), GRAINPACT n° 622899.

Références

- [1] M. Barbolini, U. Domaas, T. Faug, P. Gauer, K.M. Hakonardottir, C.B. Harbitz, D. Issler, T. Johannesson, K. Lied, M. Naaim, F. Naaim-Bouvet and L. Rammer, The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments. European Commission, Directorate-General for Research, Publication EUR 23339, edited by T. Johannesson, P. Gauer, D. Issler and K. Lied (2009).
- [2] C. Brennen, K. Sieck, and J. Paslaski, Hydraulic jumps in granular material flow, Powder Technology 35 (1983) 31-37
- [3] J. M. N. T. Gray, Y.-C. Tai, and S. Noelle, Shock waves, dead zones and particle-free regions in rapid granular free-surface flows, Journal of Fluid Mechanics 491 (2003) 161-181.
- [4] K. M. Hakonardottir and A.-J. Hogg, Oblique shocks in rapid granular flows, Physics of Fluids 17 (2005) 077101.
- [5] S. B. Savage, Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels, Journal of Fluid Mechanics 92 (1979) 53-96.
- [6] T. Faug, Jumps and bores in bulky frictional granular flows, AIP Conference Proceedings 1542 (2013) 642-645.