

## Effet d'un obstacle sur une avalanche granulaire : étude du couplage hydrodynamique / dépôt à l'amont de l'obstacle

Thierry Faug, Mohamed Naaim, Benoit Chanut & Bertrand Perrin

Cemagref de Grenoble, ETNA  
2 rue de la Papeterie BP 76, 38402 St-Martin d'Hères  
thierry.faug@cemagref.fr

### Résumé :

*Nous étudions l'influence d'un obstacle sur des avalanches granulaires s'écoulant sur un plan incliné rugueux. Le dispositif expérimental est constitué d'un réservoir stockant le volume initial de matériau granulaire qui s'écoule, après déclenchement, dans un canal incliné. Un mur vertical obstrue entièrement la sortie du canal. L'écoulement granulaire surverse par-dessus l'obstacle et vient ensuite se déposer sur un plan incliné en aval de l'obstacle. Nous mesurons le volume stocké en amont de l'obstacle et la longueur de dépôt en aval de l'obstacle. Dans le régime d'avalanche étudié ici, il n'existe pas de relation simple entre la réduction de la longueur de dépôt en aval de l'obstacle et le volume final stocké à l'amont de l'obstacle. Cette complexité provient de l'influence des dissipations locales d'énergie associées au mécanisme de propagation du dépôt en amont de l'obstacle couplé avec une intumescence hydrodynamique.*

### Abstract :

*We study the influence of an obstacle on granular avalanches flowing down a rough inclined plan. The experimental set-up consists of a reservoir to store the initial volume of granular material that flows down an inclined channel after the release. A vertical wall spans the channel exit. The granular stream overflows the obstacle and then spreads on an inclined flat runout zone downstream of the obstacle. We measure the volume retained upstream of the obstacle and the deposit length downstream of the obstacle. In the avalanche regime studied in this paper, it does not exist a single relation between the deposit length and the volume stored upstream of the obstacle. This complexity comes from the influence of the local energy dissipations associated with the propagation of the deposit upstream of the obstacle coupled with a hydrodynamic-type wave.*

### Mots-clefs :

**granulaire; obstacle ; onde**

## 1 Introduction

Nous présentons des expériences sur des avalanches granulaires impactant un obstacle. Ces expériences ont été réalisées sur la plate-forme expérimentale du Cemagref de Grenoble (UR ETNA) en application aux digues de protection contre les avalanches de neige dense. Cette plate-forme expérimentale consiste en deux plans inclinés, le plan amont étant équipé d'un canal d'écoulement. Un obstacle (barrière verticale) peut être placé en sortie du canal. Le dispositif expérimental est présenté dans la section 2. L'objectif premier de ces expériences était d'étudier la réduction de la longueur de dépôt de l'avalanche en aval de l'obstacle (obstruant la sortie du canal) et le volume final stocké en amont de l'obstacle. Ces résultats sont brièvement résumés dans la section 3. Nous avons installé une caméra vidéo au bord du canal d'écoulement, ce qui nous a permis d'étudier plus en détails le développement et la propagation d'une intumescence (onde de surface) couplée au dépôt du matériau granulaire en amont de l'obstacle. Nous présentons l'analyse et le traitement de ces films ainsi que les principaux résultats concernant le couplage hydrodynamique / dépôt à l'amont dans la section 4. Nous concluons en suggérant que

ce phénomène semble influencer fortement les dissipations locales d'énergie et par conséquent la réduction de la longueur de dépôt en aval, étudiée et quantifiée par ailleurs.

## 2 Dispositif expérimental et procédure expérimentale

Le dispositif expérimental est constitué de deux plans inclinés recouverts d'une rugosité en papier de verre (Cf. photographie de la figure 1) : (i) le plan amont est incliné à  $32^\circ$  et est équipé d'un canal de longueur 1.60 m avec un réservoir de stockage en amont, (ii) le plan aval est incliné à  $20^\circ$ . Une masse granulaire ( $m_0 = 10$  kg), constituée de billes de verre de diamètre 1 mm, est lâchée en contrôlant l'ouverture de la vanne du réservoir et s'écoule dans le canal. Ensuite la masse granulaire ralentit et s'étale dans la zone de dépôt non canalisée. Par prise de vue en sortie de canal à la paroi, on mesure l'évolution temporelle de la hauteur qui présente un maximum (figure 1.b) que l'on définira comme la hauteur de référence  $h_0$ . En outre on mesure, par prise de vue au dessus de la sortie du canal, la position du front granulaire  $x_{front}$  sur le dernier tiers du canal. L'évolution temporelle  $x_{front}(t)$  est une droite (figure 1.a), ce qui nous permet de définir une vitesse de front de référence ( $u_0$ ). La distance d'arrêt maximale ( $d_0$ ), après l'arrêt définitif de l'avalanche, est définie comme la longueur du dépôt comptée à partir du point de rupture de pente.

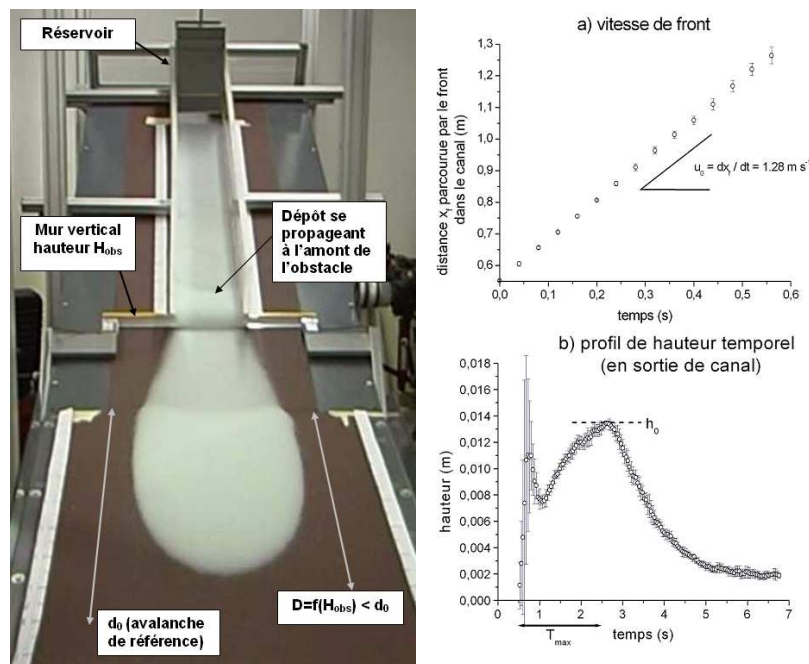


FIG. 1 – Photographie du dispositif expérimental (à gauche), avec une avalanche de grains débordant l'obstacle avant son arrêt définitif en aval de l'obstacle; a) Vitesse de front dans le canal; b) Profil temporel de hauteur en sortie de canal.

Les variables mesurées et retenues pour caractériser l'avalanche de référence sont: la vitesse de front  $u_0=1.28 \text{ m s}^{-1}$ ; la hauteur d'écoulement  $h_0=14 \text{ mm}$  et la longueur de dépôt de référence  $d_0=88.3 \text{ cm}$ . On en déduit le nombre de Froude :  $Fr = u_0/\sqrt{gh_0} = 3.4$ . Le principe des expériences consiste à placer un mur vertical (modélisant une digue paravalanche qui serait débordée) de hauteur  $H_{obs}$  en sortie de canal et à analyser son influence sur: (i) la distance maximale parcourue  $D$  en aval de l'obstacle, (ii) la masse finale stockée en amont de l'obstacle  $m_s$ , et (iii) l'évolution temporelle de la surface libre au voisinage de l'obstacle. Les principaux ré-

sultats concernant les deux premiers points sont résumés dans la section 3 alors que les résultats concernant le troisième point sont analysés dans la section 4.

### 3 Résultats sur la réduction de la longueur de dépôt en aval de l'obstacle

Une étude antérieure Faug *et al.* (2003) a montré que dans un régime "avalanche lente", la réduction de la distance d'arrêt en aval de l'obstacle est entièrement expliquée par la réduction de volume due au matériau granulaire stocké en amont de l'obstacle (Cf. figure 2). Le régime dit "avalanche lente" est caractérisé par un nombre de Froude voisin de 1, et par l'établissement d'un régime permanent et uniforme dans le canal, comme celui investigué en plan incliné dans GDRMiDi (2004). On observe expérimentalement que, dans ce régime, la réduction de la longueur de dépôt prend la forme suivante:

$$\frac{D}{d_0} = \left(1 - \frac{V_s}{V_0}\right)^{1/3} \quad (1)$$

où  $V_0 = m_0/\rho$  et  $V_s = m_s/\rho$  sont respectivement le volume initialement lâché et le volume stocké en amont de l'obstacle.  $\rho$  est la masse volumique du milieu granulaire. Le régime que nous étudions ici est caractérisé par un nombre de Froude bien supérieur à 1 en régime transitoire même si la vitesse de front mesurée est constante. Dans ce régime, l'équation 1 n'est plus vérifiée. En effet, comme le montre la figure 2, le terme de réduction de longueur de dépôt  $D/d_0$  est toujours inférieur au terme de réduction de volume  $(1 - V_s/V_0)^{1/3}$  quelque soit la hauteur de l'obstacle. Nous interprétons la différence entre le second terme  $(1 - V_s/V_0)^{1/3}$  et le premier terme  $D/d_0$  comme étant une contribution générée par les dissipations locales d'énergie. Cette différence sera notée  $f$ :

$$f = \left(1 - \frac{V_s}{V_0}\right)^{1/3} - \frac{D}{d_0} \quad (2)$$

La figure 2 montre l'évolution de la fonction  $f$  en fonction de la hauteur de l'obstacle normalisée ( $H_{obs}/h_0$ ) dans le cas des expériences présentées dans cet article ( $Fr \approx 3.4$ ).

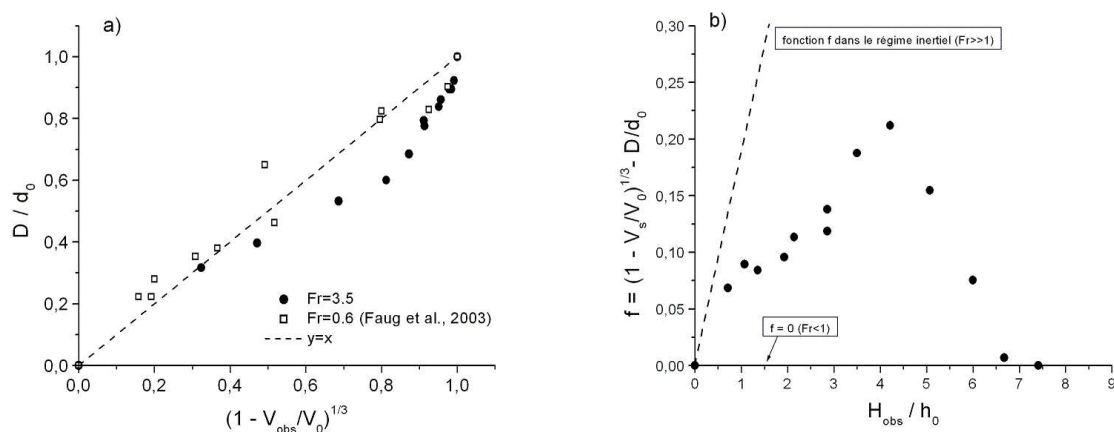


FIG. 2 – a) Réduction de la distance d'arrêt  $D/d_0$  en fonction de la réduction de volume  $(1 - V_s/V_0)^{1/3}$ ; b) Evolution de la fonction  $f$  en fonction du ratio de la hauteur de l'obstacle  $H_{obs}$  à la hauteur incidente  $h_0$ .

Dans le cas du régime "avalanche lente", la fonction  $f$  est nulle (Faug *et al.* (2003)). Dans le

cas d'un régime inertiel (écoulement très rapide:  $Fr \simeq 10$ ), peu de matériau est stocké à l'amont de l'obstacle. La fonction  $f$  est dans ce cas égale à la réduction de distance d'arrêt exprimée sous la forme  $1 - D/d_0$  ( $V_s = 0$  dans l'équation 2). La figure 2 montre que les variations obtenues pour  $f$  en fonction de  $H_{obs}/h_0$  présentent un comportement complexe. Dès que le ratio  $H_{obs}/h_0$  dépasse 5, la fonction  $f$  diminue fortement. Ce comportement s'explique par le fait que pour des grandes hauteurs d'obstacle, le volume final stocké à l'amont de l'obstacle tend vers le volume lâché initialement ( $V_s/V_0 \rightarrow 1$ ). On tend progressivement vers un régime où la contribution des dissipations locales d'énergie devient très faible en terme de réduction de distance d'arrêt. Outre ce comportement, la fonction  $f$  présente un point d'inflexion vers  $H_{obs}/h_0 \approx 2 - 3$ . Cette inflexion sera analysée par la suite.

#### 4 Etude du couplage hydrodynamique / dépôt à l'amont de l'obstacle

La prise de vue à la paroi du canal nous a permis de suivre l'évolution temporelle de la surface libre au voisinage amont de l'obstacle. Nous avons observé la formation d'un dépôt granulaire se propageant à l'amont de l'obstacle et donnant naissance à une intumescence. Nous présentons d'abord qualitativement le couplage observé (section 4.1) puis nous analysons plus en détails ce mécanisme en mettant en évidence un changement de comportement (section 4.2).

##### 4.1 Analyse qualitative du phénomène

Lorsque l'écoulement vient impacter l'obstacle, une partie de la masse incidente surverse par dessus l'obstacle alors qu'une partie de la masse incidente est "réfléchi" (voir figure 3). Le blocage progressif des grains à l'amont de l'obstacle donne naissance à un dépôt se propageant vers l'amont et générant une intumescence. La phase de reflexion correspond donc à la propagation d'une intumescence fortement couplée au stockage progressif du matériau à l'amont de l'obstacle. Les photographies sur la figure 3 permettent de visualiser ce couplage dépôt/onde à plusieurs instants. Nous définissons le temps  $T_{max}$  qui correspond au "temps de montée" de l'onde: au delà de  $T_{max}$  l'onde s'éteint car il n'y a plus assez de matériau granulaire entrant pour alimenter en amont. Le temps  $t$  est normalisé par  $T_{max}$  sur la figure 3. Notons que le temps  $T_{max}$ , de l'ordre de 2 s, est imposé par les caractéristiques de l'avalanche de référence (figure 1.b).

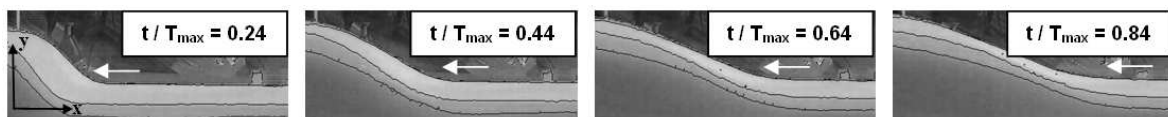


FIG. 3 – Photographies du dépôt granulaire se propageant vers l'amont de l'obstacle (de gauche à droite) couplé avec l'onde de surface à différents instants:  $t/T_{max} = 0.24, 0.44, 0.64$  et  $0.84$  (ces photographies correspondent au cas où  $H_{obs}/h_0 = 2.1$ ).

Nous avons observé que la vitesse de propagation de l'onde (mesurée à la surface libre de l'écoulement), parallèlement au fond, est égale à la vitesse du dépôt se propageant vers l'amont de l'obstacle (mesurée à la frontière entre les grains immobiles et les grains en écoulement). L'étude de l'influence de la hauteur de l'obstacle sur la vitesse de propagation de l'intumescence, donc du dépôt granulaire, nous a permis de mettre en évidence un changement de comportement que nous décrivons plus en détails dans la section 4.2.

## 4.2 Transition de régime "zone morte - onde"

La figure 4.a présente l'évolution temporelle de la surface libre selon la direction  $x$  parallèle au fond pour  $y/h_0 = 1$ , où  $y$  est la direction perpendiculaire au fond (Cf. figure 3). On observe un regroupement de l'ensemble des courbes dès que la hauteur de l'obstacle dépasse une valeur critique  $H_c$  définie expérimentalement par  $2 < H_c/h_0 < 3$ .

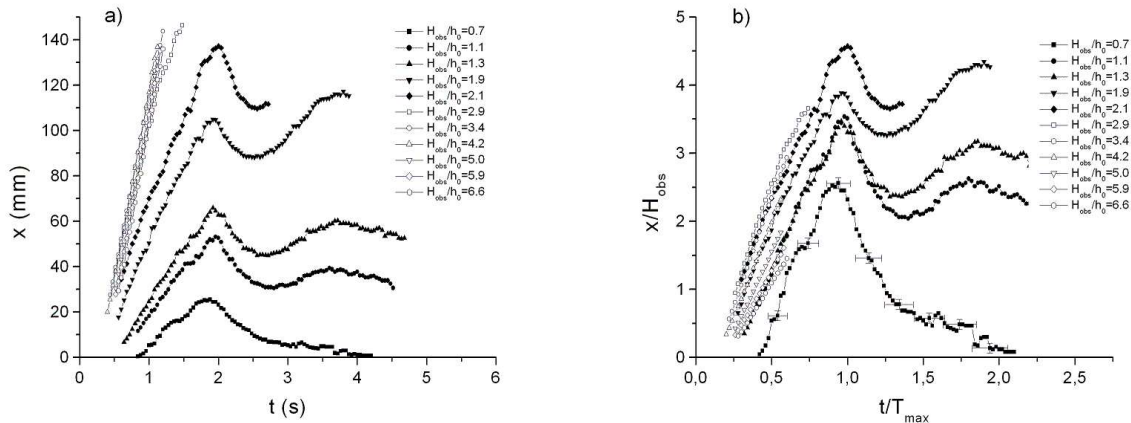


FIG. 4 – a) Distance parcourue ( $x$ ) le long du canal par l'onde de surface en amont de l'obstacle en fonction du temps ( $t$ ). b) Distance parcourue par l'onde de surface en amont de l'obstacle normalisée par la hauteur de l'obstacle ( $x/H_{obs}$ ) en fonction du temps normalisé ( $t/T_{max}$ ).

Sur la figure 4.b, nous présentons les mêmes données où la distance parcourue est normalisée par la hauteur de l'obstacle  $H_{obs}$  et le temps est normalisé par le temps caractéristique  $T_{max}$ . Si on se limite à  $t/T_{max} < 1$ , les courbes de la figure 4.b sont des droites. Elles sont approximées par:

$$\frac{x}{H_{obs}} = \alpha \frac{t}{T_{max}} + \beta \quad (3)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  dépendent a priori de  $H_{obs}$  et  $y$ . Nous avons tracé les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction du ratio  $H_{obs}/h_0$  sur la figure 5 pour différentes valeurs de  $y/h_0$  (1; 1.2; 1.8). Les paramètres  $\beta$  et  $\alpha$  rendent clairement compte d'un changement de comportement. Le paramètre  $\beta$  augmente avec la hauteur de l'obstacle et passe par un maximum vers  $H_{obs}/h_0 = 2-3$ , puis diminue. Pour les hauteurs plus élevées, le paramètre  $\beta$  devient constant. Notons que le paramètre  $\beta$  ne dépend pas de  $y/h_0$ . Le paramètre  $\alpha$  rend compte également d'un changement de comportement. Il augmente avec la hauteur de l'obstacle et passe par un maximum vers  $H_{obs}/h_0 = 3$ . Les courbes obtenues pour  $\alpha$  montrent une dispersion provenant de l'influence de  $y/h_0$ . Nous observons que l'analyse de la vitesse de propagation de la zone morte (courbe avec les symboles carrés vides sur la figure 5) rend compte des mêmes variations pour  $\alpha$  et  $\beta$ . Ce résultat confirme le couplage fort entre le dépôt granulaire et l'intumescence se propageant à l'amont.

Les courbes de la figure 5 nous permettent de mettre en évidence un changement de comportement pour  $H_{obs}/h_0 \approx 2-3$ . A ce stade il reste difficile d'analyser de manière quantitative les effets de cette onde de surface sur la fonction  $f$  (définie dans la section 3) mais nous pensons que cette transition de régime observée sur la vitesse de propagation de l'onde de surface va directement influencer la variation de  $f$  et donc la longueur de dépôt en aval de l'obstacle. On rappelle que l'évolution de la fonction  $f$  en fonction de la hauteur de l'obstacle montre un point d'inflexion pour  $H_{obs}/h_0 \approx 2-3$  (figure 2.b dans la section 3). Notons que la diminution de  $f$

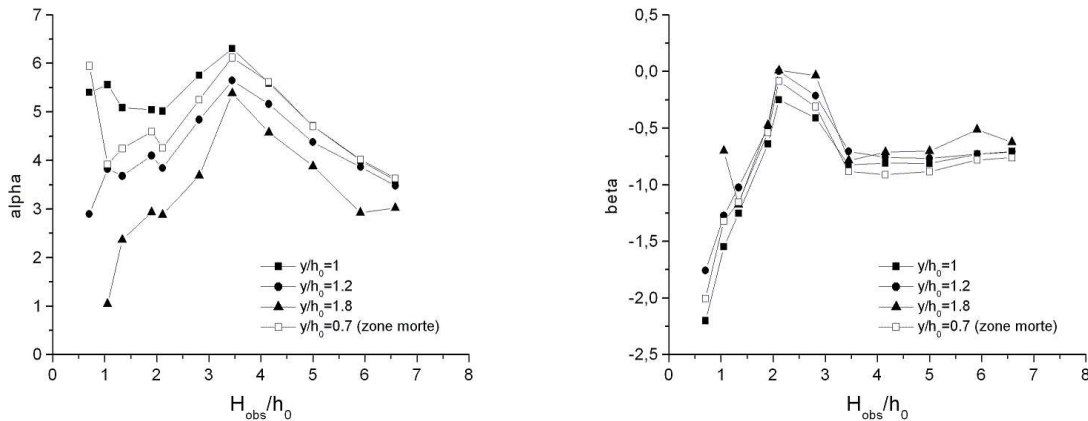


FIG. 5 – Coefficients  $\alpha$  (graphe à gauche) et  $\beta$  (graphe à droite) en fonction de la hauteur de l'obstacle normalisée ( $H_{obs}/h_0$ ). Les résultats sont présentés pour différentes valeurs de  $y/h_0$ :  $y/h_0 = 0.7$  (mesures sur la zone morte) et  $y/h_0 = 1$ ,  $y/h_0 = 1.2$ ,  $y/h_0 = 1.8$  (mesures à la surface libre).

pour  $H_{obs}/h_0 \approx 5$  n'est pas visible sur les courbes  $\alpha(H_{obs}/h_0, y/h_0)$  et  $\beta(H_{obs}/h_0)$ . Ce résultat est normal puisque les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont déduits de l'analyse pendant la phase de montée ( $t/T_{max} < 1$ ). Le volume final stocké en amont de l'obstacle tend vers le volume initialement lâché ( $V_s/V_0 \rightarrow 1$ ) pour des temps longs ( $t \gg T_{max}$ ). Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  ne peuvent donc pas rendre compte de cet effet visible sur  $f$ .

## 5 Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté des expériences concernant des avalanches granulaires débordant un obstacle (mur vertical). Les expériences ont consisté à réaliser des mesures sur l'extension maximale du dépôt granulaire en aval de l'obstacle et le volume final stocké en amont de l'obstacle. Dans le régime d'avalanche étudié, on a montré que la réduction de volume générée par l'obstacle ne suffit pas à expliquer la réduction de l'extension maximale de l'avalanche. La différence, en terme de réduction de distance d'arrêt, est due à des dissipations locales d'énergie que nous avons choisies de décrire par une fonction  $f$ . L'évolution de  $f$  en fonction de  $H_{obs}$  montre deux changements de comportement aux hauteurs d'obstacle notées  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$ . Pour des grandes hauteurs d'obstacle, le volume final stocké en amont de l'obstacle tend vers le volume initialement lâché, ce qui explique le changement de comportement à  $H_{obs} = H_{c2}$ . Nous n'avons pas encore d'explication claire pour  $H_{obs} = H_{c1}$ . L'analyse du dépôt granulaire se propageant à l'amont et couplé avec une intumescence se propageant aussi vers l'amont (pour  $t < T_{max}$ ), nous a permis de mettre en évidence un changement de comportement pour une hauteur d'obstacle proche de la hauteur  $H_{c1}$ . Ce travail offre donc une perspective de recherche prometteuse concernant en particulier la nature du changement de comportement observé et la quantification du terme de dissipations locales d'énergie.

## Références

- Faug, T., Naaim, M., Bertrand, D., Lachamp, P., Naaim-Bouvet, F. 2003 Varying dam height to shorten the run-out of dense avalanche fbws: developing a scaling law from laboratory experiments. *Surv. Geophys.* **24** 555-568
- GDRMiDi.2004 On dense granular fbws. *Eur. phys. E Soft matter.* **14** (4) 341-365