



**HAL**  
open science

## Calculs par épandage à petite échelle et à grande échelle

Jean François Serratrice

► **To cite this version:**

Jean François Serratrice. Calculs par épandage à petite échelle et à grande échelle. Journées Aléa Gravitaire, Sep 2013, Grenoble, France. <hal-02551950>

**HAL Id: hal-02551950**

**<https://hal.science/hal-02551950v1>**

Submitted on 23 Apr 2020

**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.



HAL Authorization

# Calculs par épandage à petite échelle et à grande échelle

J.F. Serratrice

*CETE Méditerranée, Aix en Provence France*

**RESUME :** La méthode de calcul par épandage a pour objectif de simuler la propagation le long d'un versant montagneux puis l'accumulation et l'étalement dans la vallée d'un amas rocheux volumineux et destructeur. La communication présente sommairement la méthode de calcul, puis des simulations à différentes échelles avec la modélisation d'un écoulement rocheux historique, puis la modélisation d'expérimentations en laboratoire.

## 1 INTRODUCTION

La méthode de calcul par épandage a pour objectif de simuler la propagation le long d'un versant montagneux puis l'accumulation et l'étalement dans la vallée d'un amas rocheux volumineux et destructeur. Le calcul s'appuie sur la topographie du site définie à trois dimensions par un modèle numérique de terrain précis (MNT). Le volume rocheux instable est discrétisé en petits éléments de volume. Après déclenchement du mouvement, ces éléments se déplacent sur le MNT et les uns par rapport aux autres en glissant, jusqu'à trouver un équilibre en fond de vallée où ils s'accumulent et s'étaient. L'amas rocheux en mouvement est associé en permanence à la morphologie du versant par une mise à jour du MNT à chaque pas de calcul. La dissipation de l'énergie est produite essentiellement par frottement des éléments glissants entre eux et sur la surface du versant.

La méthode a tout d'abord été appliquée au site de la Clapière puis au site de Séchilienne (Serratrice, 2006). Elle a été appliquée à la simulation d'écoulements de gravier en laboratoire d'après les expérimentations de Manzella (2005) et Manzella et Labiouse (2008), puis à l'écoulement de billes de verre le long de plans inclinés de différentes pentes d'après les expérimentations de Pouliquen et Forterre (2002). La méthode est appliquée aussi à la simulation des écoulements observés dans trois sites des Alpes et dans le cadre du programme Interreg IIIA, action C (Pasqualotto, 2006 ; Manzella et al., 2008). L'un de ces cas est présenté ici à titre d'exemple de simulation d'un écoulement en vraie grandeur. Puis des exemples de simulation sont consacrés à l'écoulement de matériaux granulaires en laboratoire (Manzella et Labiouse (2008) ; Labiouse et al., 2013).

## 2 PRESENTATION DE LA METHODE DE CALCUL

### 2.1 Hypothèses

L'application de la modélisation par épandage dans un site montagneux fait appel à différents types de connaissances et de données : des données géologiques, hydrogéologiques, structurales et historiques du site, des données topographiques et des paramètres mécaniques. Les connaissances générales du premier ensemble sont le fruit des observations recueillies sur le site, des reconnaissances, d'un suivi instrumental quand il existe, et d'une interprétation préalable de ces données. Cette connaissance est essentielle, car elle permet de définir, entre autres, les scénarios de rupture. Le plus souvent, devant l'indétermination des mécanismes de déclenchement, plusieurs scénarios peuvent être mis en jeu dans le cadre d'une étude paramétrique du site.

Pour les données qui intéressent directement la phase de modélisation par épandage, le MNT rassemble les données topographiques du site. Sa qualité (étendue, précision des altitudes, densité de points, qualité de la restitution des détails morphologiques du versant, etc.) doit être compatible avec la finesse de la discrétisation en éléments glissants. Cette qualité détermine pour l'essentiel le résultat de la modélisation. Une densité de 2500 points par hectare (maille de 2 m) semble acceptable en pratique, pour une surface de quelques centaines d'hectares.

Le calcul par épandage proprement dit fait appel à une dizaine de paramètres mécaniques dont l'importance est inégale. Dans la modélisation, la dissipation de l'énergie est produite essentiellement par frottement des éléments glissants entre eux et sur la surface du versant. Une loi est admise, qui définit le frottement comme une fonction de la vitesse instantanée de chaque élément glissant. Les paramètres de frottement sont donc déterminants dans le résultat du calcul. Leur choix permet de réguler le taux de fluidisation de l'amas rocheux en mouvement et, par conséquent, l'étalement de celui-ci dans la vallée. De même, une loi d'évolution est admise pour le volume (foisonnement) et la forme des éléments glissants. Cette loi fait appel à d'autres paramètres dont l'importance relative est moindre dans la modélisation. Enfin, d'autres données sont appelées en entrée du modèle, comme le poids volumique initial de la roche, la vitesse initiale des volumes élémentaires (module et direction, nulle le plus souvent), l'ordre de mise en mouvement des éléments, etc.

## 2.2 Équations et paramètres

Après discrétisation du volume rocheux instable en petits éléments, le calcul par épandage s'effectue par pas de temps successifs. A un instant donné, la trajectoire d'un élément glissant au sein de l'amas rocheux est déterminée par l'équation dynamique du mouvement appliquée au plan tangent local couvert par l'élément. A chaque pas de temps, l'intégration de l'équation du mouvement est effectuée localement pour tous les éléments, en tenant compte de la vitesse atteinte au pas de temps précédent.

L'originalité de la méthode de calcul par épandage repose sur le fait que le volume de l'ensemble des éléments glissants est pris en compte à chaque pas de temps pour être associée à la surface topographique et représenter l'évolution de la propagation. Pour cela, le MNT associe à la fois la surface du versant (et le volume du massif situé en dessous) et l'amas rocheux en mouvement qui se superpose au versant. A un instant  $t$ , l'élément considéré est repéré par sa position sur le MNT, ce qui permet de définir le plan tangent local associé momentanément à cet élément, puis l'élément est déplacé sur le MNT en fonction de sa vitesse, pour aboutir à sa nouvelle position au temps  $t + \Delta t$ . De ce fait, le pas de calcul représente à la fois le pas d'intégration de l'équation de la dynamique et le laps de temps pendant lequel un élément est considéré comme pouvant se déplacer seul dans l'ensemble de l'amas rocheux en mouvement, indépendamment des autres éléments.

La méthode de calcul par épandage permet donc de suivre à chaque instant la position de tous les éléments glissants dans l'espace. Ce procédé fournit ainsi un moyen de modéliser la propagation et l'épandage de l'amas rocheux considéré, en donnant à chaque instant la position de tous ses éléments, l'étendue de l'amas et sa forme, de l'instant du déclenchement, jusqu'à sa stabilisation complète. Comme indiqué plus haut, la modélisation fait appel à deux lois d'évolution locales. Une première loi fixe le rapport entre le frottement  $\mu = \tan \phi$  et la vitesse instantanée  $v$  d'un élément glissant. Le frottement augmente asymptotiquement vers une valeur limite  $\mu_1$  quand la vitesse augmente. Il reste égal à une valeur minimale  $\mu_0$  quand  $v$  est inférieure à  $v_0$ . Cette formulation est inspirée des lois proposées par Pouliquen (1999).

L'autre loi traite de l'évolution de la forme et du volume de chaque élément glissant dans son parcours. Chaque volume élémentaire est supposé prendre la forme d'un paraboloïde de section elliptique. Pendant le glissement, les axes principaux de l'ellipsoïde sont déterminés par la direction de sa vitesse et la plus grande pente au point considéré de la trajectoire. Les lois d'évolution des volumes élémentaires s'écrivent, en fonction de l'abscisse curviligne  $s$  de l'élément. Le foisonnement suit une loi analogue.

Tous ces paramètres ne sont pas accessibles à la mesure directe. Ils ne sont pas totalement indépendants entre eux et ils produisent des effets croisés sur le résultat de la modélisation. Leur choix ne peut être opéré qu'en référence à des retours d'expérience opérés à partir d'événements connus. En l'absence de certitude précise quant à leur détermination, des études paramétriques ou de sensibilité sont à envisager.

Dans la modélisation, la masse instable, puis l'amas rocheux qui en découle, sont supposés homogènes et formés par des éléments identiques. Les paramètres ne varient pas d'un point à l'autre du site, qui est supposé homogène dans son ensemble. La prise en compte de terrains différents ou des matériaux différents en surface n'est pas envisagée dans les cas courants, faute de disposer des données nécessaires (terre, éboulis, roche nue, neige, glace, étendue d'eau ou surface marécageuse, etc.).

Une autre classe de données fondamentales concerne la description de la forme initiale de la masse instable et sa discrétisation en éléments glissants avant déclenchement. De grandes incertitudes accompagnent généralement ces données, devant la méconnaissance des conditions structurales, hydrauliques, mécaniques et autres qui caractérisent la masse instable. Au mieux, le volume instable est à peu près connu dans la majorité des cas.

### 3 APPLICATION AU CAS D'UN SITE REEL

#### 3.1 Présentation

L'exemple de simulation proposé est appliqué à l'éroulement de Charmonétier qui s'est produit en 1997 près de Bourg d'Oisans (Isère). L'éroulement concerne une masse rocheuse de  $130000 \text{ m}^3$  formant une sorte de banc qui s'est détaché à la faveur de la foliation du massif dont le pendage est défavorable vers le nord-est (Couture et al., 1997). En se propageant dans cette direction, l'amas rocheux a emprunté deux talwegs dans lesquels les débris sont restés prisonniers en grande partie. Le MNT représentant le versant a été levé au pas de 1,25 m et couvre une surface à 21,3 ha. Faute de précision suffisante, la comparaison des MNT avant et après rupture ne restitue pas la localisation, la forme et les volumes de la niche d'arrachement et des dépôts.

#### 3.2 Simulation

Pour mener à bien le calcul, la zone d'arrachement a été modélisée par la superposition de trois couches d'éléments glissants positionnés à l'intérieur de polygones dont les coordonnées des sommets ont été levées sur le plan du site. Une épaisseur décroissante en allant vers l'ouest a été donnée au banc instable. L'ordre de départ des éléments glissants a été choisi pour progresser de l'aval à l'est vers l'amont à l'ouest. Au total, le modèle contient 1199 éléments glissants. Les paramètres mécaniques ont été obtenus par tirs et essais successifs afin de trouver la forme finale du dépôt. Ainsi, des fortes valeurs ont été attribuées aux angles de frottement qui caractérisent le glissement des éléments. Ces fortes valeurs se traduisent par des vitesses faibles (la vitesse maximale des éléments glissants est égale à 27 m/s, soit 96 km/h) et un écoulement lent de l'amas rocheux (durée de la propagation 300 s).

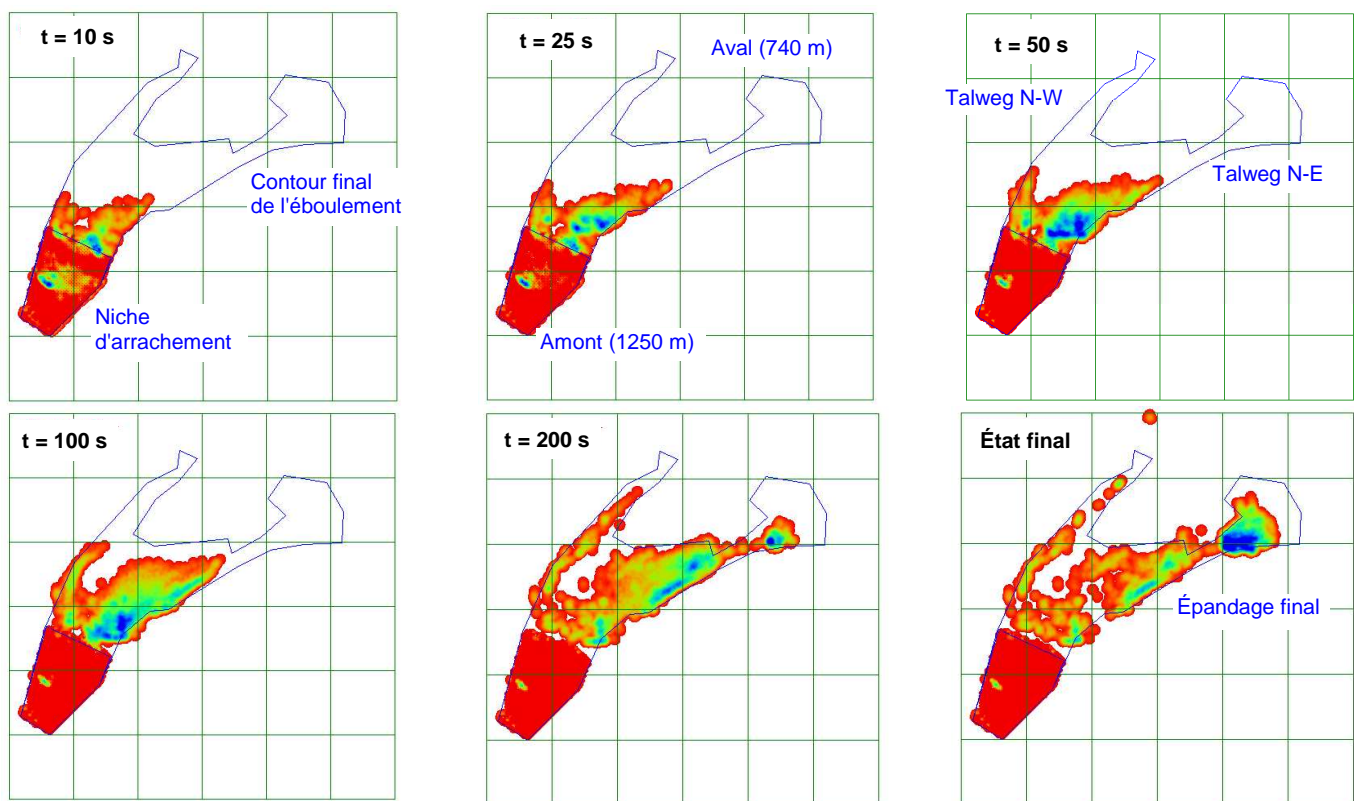


Figure 1. Calcul par épandage appliqué à l'éroulement de Charmonétier près de Bourg d'Oisans (Isère) en 1987. Vues en plan successives de la propagation de l'amas rocheux depuis la zone d'arrachement en amont jusqu'à l'épandage final en aval du versant.

La figure 1 montrent des vues successives de la propagation de l'amas rocheux à 10 s, 25 s, 50 s, 100 s, 200 s et 300 s après le déclenchement. Sur ces vues en plan, la forme finale du dépôt est représentée par un polygone de couleur bleue, avec ses deux bras terminaux d'après le plan du site après éboulement. Le carroyage est donné à un pas de 100 m. Les débris en mouvement ou stabilisés en fin de parcours sont représentés par l'ensemble des éléments glissants du modèle (posés à plat sur un plan fictif horizontal), selon une échelle des épaisseurs allant du rouge (épaisseur nulle), vers le bleu (épaisseur de quinze mètres environ). La

forme finale du dépôt est pratiquement atteinte au bout de 200 s, mais des éléments instables continuent à se propager pendant 100 s encore avant de trouver l'équilibre sur le cône formé au pied du talweg principal (au nord-est), où l'accumulation est la plus importante. Le calcul aboutit à un nouvel MNT duquel il est possible d'extraire les contours de l'épandage final, la forme et l'épaisseur des dépôts, ainsi que des profils. Ce MNT ou les nouveaux profils peuvent être utilisés alors pour effectuer des calculs de propagation de volume résiduels isolés.

## 4 APPLICATION AUX EXPERIMENTATIONS EN LABORATOIRE

### 4.1 Présentation

Des campagnes expérimentales ont été menées au Laboratoire de Mécanique des Roches (EPFL) avec pour objectifs d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu lors de la propagation d'avalanches rocheuses, d'identifier les paramètres influents, puis de quantifier leur influence sur l'étendue des zones susceptibles d'être touchées ainsi que sur les caractéristiques du dépôt final et enfin d'obtenir un ensemble de données expérimentales permettant de valider et caler des codes de calcul (Labiouse et al. 2013).

Les campagnes expérimentales sont menées en lâchant d'une boîte des matériaux granulaires secs sur un plan incliné (versant) qui se termine par une zone d'accumulation horizontale (vallée). Les essais sont organisés afin de mettre en évidence l'influence sur la propagation de la masse et la morphologie du dépôt (longueur, largeur, hauteur) de divers paramètres, à savoir la nature du matériau (sable, gravier, briquettes), la hauteur de lâcher, le volume de matériau et sa séquence de lâcher (en une ou plusieurs fois), l'inclinaison du plan et le type de matériau constituant sa surface (rugueux ou lisse), la morphologie de la transition entre les plans incliné et horizontal (brusque ou progressive). Une première campagne expérimentale a été menée avec du gravier (Manzella et Labiouse 2008, 2009, 2012). Une seconde campagne expérimentale a été menée ensuite pour préciser l'influence de certains facteurs (Labiouse et al. 2012, 2013)

### 4.2 Simulations

Les graphiques de la [figure 2](#) montrent l'évolution de la masse en mouvement dans un calcul représentant l'écoulement de 40 litres de gravier sur le plan incliné à 45 °, pour un lâcher à 1 m d'altitude.

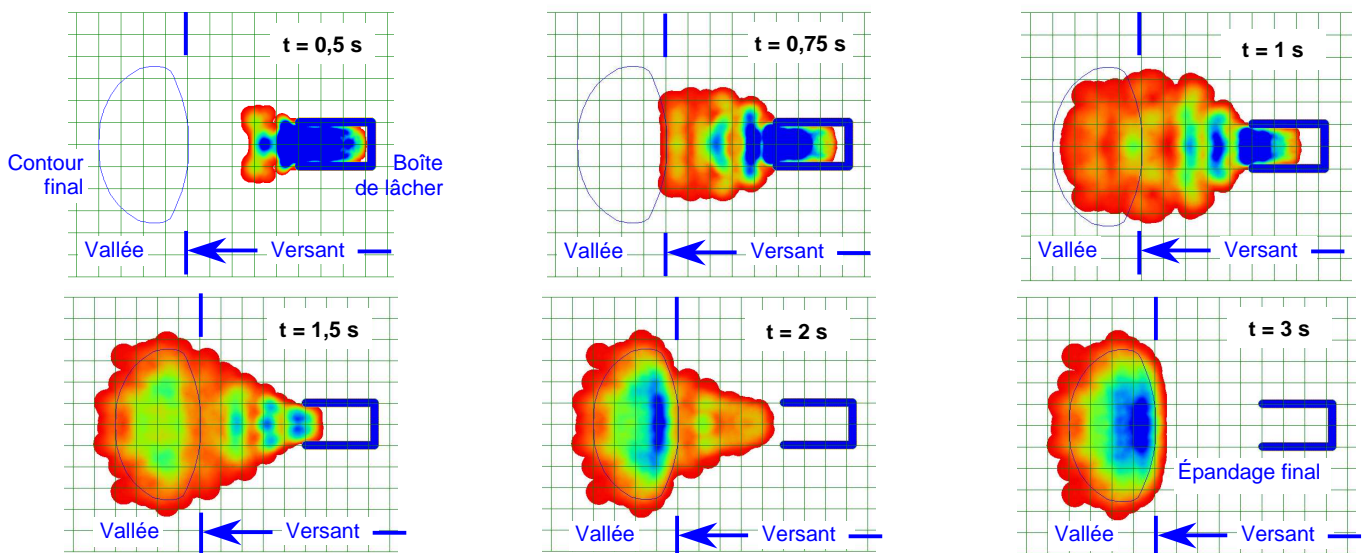


Figure 2. Calcul par épandage pour simuler une expérience de laboratoire d'écoulement de gravier le long du plan incliné à 45 ° (volume 40 l). Évolution en fonction du temps. Vues en plan (maille 20 cm, épaisseurs du dépôt de 0 en rouge à 8,5 cm en bleu).

La [figure 2](#) montre des vues en plan successives des graviers en mouvement le long du plan incliné puis leur épandage sur le plan horizontal. Les trois côtés fermés de la boîte sont représentés en bleu sur le plan incliné. Le contour du dépôt final observé est représenté en bleu sur la plan horizontal. Le carroyage est représenté au pas de 0,1 m. Les altitudes des débris sont comprises entre 0 (en rouge) et 8,5 cm (en bleu). Le résultat final du calcul est indiqué en bas à droite de la [figure 2](#). Au temps t = 3 s, la forme finale de l'épandage est presque atteinte. Seuls quelques éléments sont encore en mouvement résiduel. Le calcul fait apparaître des

ondulations qui sont attribuables à l'arrangement initial des éléments glissants en rangées régulières. Ces ondulations contribuent à retarder l'écoulement en constituant une gêne pour le déplacement des éléments qui sont encore situés en amont. Ces ondulations contribuent aussi à élargir le flot dans la direction des horizontales du plan incliné, ce qui détermine la largeur finale du dépôt, largeur qui se trouve souvent en excès par rapport à l'observation. Il faut bien garder en tête que la forme initiale des matériaux détermine pour beaucoup la forme finale de l'épandage. Le choix s'est porté ici sur une forme parallélépipédique. La description détaillée de l'écoulement dans les premiers instants du lâcher, tel qu'il s'opère expérimentalement, sort du cadre de la modélisation.

Les éléments glissants représentant le gravier sont circulaires et étalés initialement et ils s'étalent encore pendant leur mouvement, pour aboutir à des formes adoucies du dépôt. Les éléments glissants représentant les briques sont allongés et sont élancés initialement et ne changent pas de forme, pour aboutir à un dépôt de forme chaotique. La [figure 3](#) donne une illustration de l'effet de ces paramètres en comparant l'épandage de briques placées en vrac initialement à celui de briques empilées initialement. Il s'agit de vues en plan des dépôts calculés après stabilisation sur le plan horizontal qui constitue la vallée dans le modèle physique. La maille du carroyage est égale à 0,2 m. Les briques empilées initialement gagnent un très fort volume par foisonnement et "explosent" en arrivant dans la vallée, comme semble l'indiquer le contour approximatif de l'étalement observé et contrairement au gravier qui adopte une forme adoucie ([figure 2](#)). Les couleurs indiquent les épaisseurs des dépôts, qui sont comprises entre 0 en rouge et 8,5 cm en bleu.

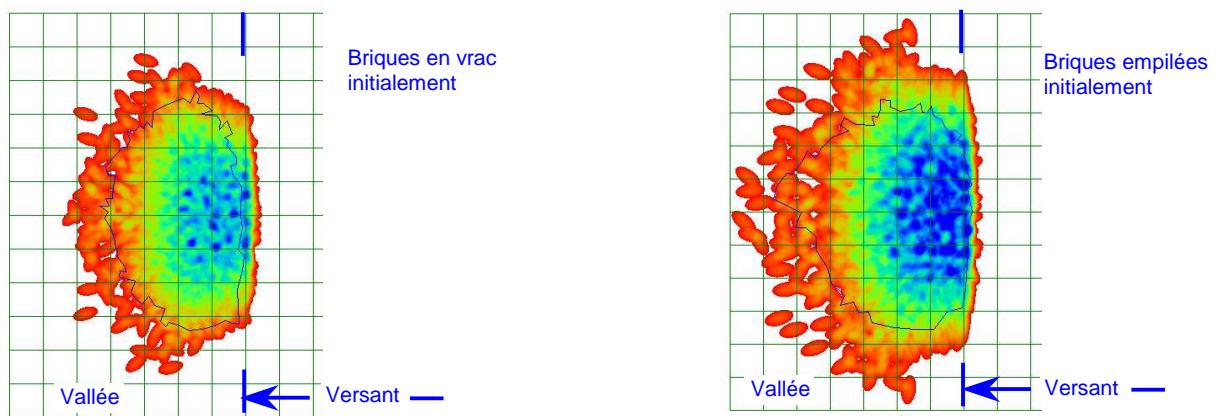


Figure 3. Calcul par épandage pour simuler une expérience de laboratoire d'écoulement des briques le long du plan incliné à 45 ° (volume 40 l). Dépôts finals. Vues en plan (maille 20 cm, épaisseurs du dépôt de 0 en rouge à 8,5 cm en bleu). A gauche briques mises en vrac initialement. A droite, briques empilées initialement.

## 5 CONCLUSION

La modélisation des avalanches rocheuses repose sur des hypothèses fortes et simplificatrices qui confèrent à cette approche un caractère approximatif. Seules des simulations globales sont envisageables comme le confirment les présents calculs. Des simulations ont été entreprises pour représenter des instabilités à différentes échelles, sur des cas documentés en vraie grandeur et des expériences de laboratoire.

Les simulations des écroulements historiques montrent qu'il est possible de d'aboutir à peu près à la forme finale des dépôts sachant que de grandes incertitudes affectent tous les paramètres de la modélisation. Par contre, la dynamique du mouvement n'est pas documentée dans les événements historiques. En pratique, la mise en œuvre de la méthode ne peut être envisagée qu'avec une connaissance précise du site à modéliser, en matière de scénarios de rupture notamment. Il faut disposer d'un MNT de qualité, suffisamment étendu et précis. Le choix des paramètres mécaniques du modèle reste une étape délicate de la modélisation. Les calculs paramétriques d'épandage sont à envisager le plus souvent, en jouant sur les paramètres du modèle et pour chacun des scénarios de rupture appréhendés.

La modélisation des expériences de laboratoire a été réalisée en utilisant un nombre réduit d'éléments glissants, commun à toutes les expériences, et en cherchant des jeux de paramètres uniques pour chaque matériau (graviers, briques). Ainsi, les paramètres qui gèrent l'évolution de la forme des éléments glissant permettent de donner aux dépôts de gravier des formes adoucies, contrairement aux briques dont les paramètres ont été choisis pour aboutir à des dépôts de forme chaotique. La forme des éléments contribue pour partie à la dissipation

de l'énergie totale au cours du mouvement, au même titre que les aspérités ou les ruptures de pente dans la morphologie du versant. Mais, parmi les paramètres, le frottement constitue la source principale de dissipation de l'énergie. Il s'avère que les paramètres de frottement à introduire dans les calculs sont peu variables d'un matériau à l'autre et d'un essai à l'autre, ce qui est conforme au fait que les expérimentations aboutissent à des distances de parcours sur le plan horizontal qui sont peu différentes.

Pour finir, la qualité de la modélisation d'un site ne dépend que pour une petite partie de la qualité de l'outil de calcul. En fait, la qualité de la modélisation d'un site dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles (historique, reconnaissances du site, qualité du MNT). Mais elle dépend aussi fortement de la qualité de l'ensemble des analyses et des interprétations qui ont permis de mettre en place la modélisation, ses hypothèses, les scénarios qui la composent et les paramètres de calcul, tout en fixant les limites de son utilisation dans le cadre des hypothèses adoptées et en vue des applications pratiques envisagées.

## 6 PREFERENCES

- Couture, R. Antoine, P. Locat, J. Hadjigeorgiou, J. Evans, S.G. Brugnot, G. 19972. Quatre cas d'avalanches rocheuses dans les Alpes Françaises. *Cal. Geotech. J.* 34: 102-119.
- Labiouse, V. Serratrice, J.F. Bost, M. 2012. Modélisations numérique des expérimentations d'avalanches rocheuses à petite échelle EPFL - LMR - Lausanne. *Restitution du projet MASSAL* 1-10.
- Labiouse, V. Sauthier, C. Bost, M. Serratrice, J.F. 2013. Contribution du LMR – EPFL à l'action 3 du projet MASSA. *Restitution du projet MASSAL* 1-14.
- Manzella, I. 2005. Modélisations physiques pour l'étude de la propagation des avalanches rocheuses. *Sols et Roches. Bulletin des laboratoires de mécanique des sols et des roches EPFL* 35: 1-2.
- Manzella I., Pirulli M., Naaim M., Serratrice J.F., Labiouse V. 2008. Numerical modelling of a rock avalanche laboratory experiment in the framework of the "Rockslidetec" alpine project. *Proc. Int. Conf. on Landslides and Engineered Slopes*: 835-841.
- Manzella I., Labiouse V. 2008. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 41: 133-151.
- Manzella I., Labiouse V. 2009. Flows experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches. *Engineering Geology* 109: 146-158.
- Manzella I., Labiouse V. 2012. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation. *Landslides* DOI: 10.1007/s10346-011-0313-5.
- Sous la direction de Pasqualotto, M. 2006. Développement d'outils méthodologiques pour la détection et la propagation des éboulements en masse. *Rapport final RockSlidetec (projet européen Interreg III – ALCOTRA, projet n° 23)*.
- Pouliquen, O. 1999. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Phys. Fluids* 11: 542-549.
- Pouliquen, O. Forterre, Y. 2002. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane. *J. Fluid. Mech.* 453: 133-151.
- Serratrice, J.F. 2006. Modélisation des grands éboulements rocheux par épandage. Application aux sites de la Clapière (Alpes Maritimes) et de Séchilienne (Isère). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* 263-264: 53-69.