

Approche d'homogénéisation « monofluide » pour des écoulements granulaires secs fortement dilatants

Application au cas des éboulements rocheux en grande masse

Isabelle ROCHET BOUZID

Docteur de l'Université Lyon I
Groupe Mécanique des roches

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon

RÉSUMÉ

La prévision de l'extension des éboulements rocheux en grande masse reste une question essentielle pour la prévention du risque. Cette recherche constitue une contribution à l'étude de la modélisation de ces phénomènes. Dans cet objectif on s'est intéressé aux écoulements granulaires secs monodisperses fortement dilatants.

Afin de comprendre les mécanismes de propagation, une étude expérimentale d'écoulement en canal incliné a été menée sur des particules de formes irrégulières. Les résultats expérimentaux soulignent l'importance de l'agitation (température granulaire) responsable de la dilatace dans l'écoulement. Ces observations ont permis de proposer une forme générale d'une loi d'état caractéristique.

Parallèlement la faisabilité d'une approche numérique d'homogénéisation a été examinée, traitant ainsi un « pseudofluide » monophasique doté d'une loi d'état de la forme expérimentale. La confrontation des résultats numériques et expérimentaux confirme la faisabilité de cette démarche, mais également l'intérêt d'une modélisation par un monofluide pour l'analyse des phénomènes induits (poussières, effet de soufflé).

Introduction

Les éboulements rocheux représentent dans les régions montagneuses un risque naturel largement répandu. Ces phénomènes généralement maîtrisables dans le cas de chutes de pierres et de blocs, peuvent devenir incontrôlables et leurs conséquences catastrophiques lorsque les volumes mobilisés deviennent importants.

Les mouvements de terrain de grande ampleur, dont les volumes mis en jeu sont supérieurs à 1 hm^3 , constituent des catastrophes naturelles heureusement exceptionnelles, mais le plus souvent dévastatrices susceptibles d'entraîner des dommages humains et économiques très importants. L'énergie considérable mise en jeu par ce type de phénomène à très grande échelle rend inefficace toute solution technique de stabilisation ou de protection. Il est donc indispensable de mettre en place dans les zones exposées à de tels risques, des stratégies de prévention-surveillance visant à en réduire les conséquences.

La prévision de l'extension possible du phénomène constitue un objectif essentiel sur le plan de la prévention. Diverses études dans le domaine de la modélisation, développées depuis plusieurs années ont permis de progresser dans cette voie, sans toutefois conduire à des résultats véritablement satisfaisants [4, 6, 11]. Des approches par la mécanique des sols, par la mécanique des fluides ou encore des approches particulières par la mécanique du contact permettent d'obtenir des représentations généralement convenables des éboulements utilisés pour leur calage, mais la généralisation de ces modèles à d'autres cas réels est souvent délicate. Des problèmes tels que la complexité des phénomènes physiques, la méconnaissance de certains paramètres ou l'inadéquation des lois de

comportement utilisées, sont à l'origine des difficultés rencontrées dans ces différentes tentatives de modélisation des éboulements catastrophiques. Des recherches théoriques et expérimentales sont menées depuis de nombreuses années sur les écoulements granulaires dans le but notamment d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques liés aux écoulements de matériaux granulaires secs et de développer des approches de modélisation adaptées à ce type de milieu [1, 4, 7, 8, 10]. Très tôt, cette démarche a été élargie au domaine des éboulements rocheux.

L'analyse des données d'observation tirées de cas réels d'éboulements rocheux en grande masse [2, 3, 12] conduit à penser qu'un mécanisme de dilatance joue sans doute un rôle essentiel dans la dynamique de ces phénomènes. C'est pourquoi, dans le cadre d'une contribution à l'étude de la modélisation des éboulements en grande masse [9] par une approche d'homogénéisation « monofluide », il est apparu essentiel d'observer le comportement d'écoulements granulaires secs fortement dilatants.

Le problème particulier de la simulation des avalanches rocheuses en grande masse est abordé ici d'un point de vue de mécanicien des fluides au travers d'une approche d'homogénéisation. On assimile l'éboulement rocheux à l'écoulement d'un milieu continu auquel des propriétés particulières confèrent un caractère granulaire. La modélisation d'un tel écoulement repose alors sur des modèles de calcul de type milieu continu, appliqués à la dynamique des fluides. Les expériences numériques d'écoulement réalisées avec le code de calcul FIDAP ont nécessité la substitution de la loi d'état classique des gaz parfaits par une nouvelle forme de loi d'état expérimentale caractérisant le comportement très dilatant de ces grands mouvements de terrains.

Afin de mieux comprendre le comportement de ces écoulements particuliers et d'approcher une forme de « pseudo loi d'état » du type de celles utilisées dans les codes de calcul en dynamique des fluides, quelques expériences simples ont été réalisées. Des particules de formes irrégulières, une macro rugosité du substratum ainsi qu'un débit d'écoulement adapté ont permis de réaliser des écoulements granulaires que nous appellerons ici « dilatants », dont les profils de compacité sont semblables à ceux d'un écoulement de type « bouchon » (Azanza, 1998).

Définition d'un « écoulement dilatant »

Le terme « dilatant » est utilisé ici par extension pour caractériser le rôle prépondérant de la rota-

tion de particules de forme irrégulière, dans la forte expansion de la veine et dans le maintien de la faible compacité de l'écoulement.

Les expériences réalisées n'ont pas pour but de reproduire à échelle réduite des avalanches rocheuses en grande masse, ni de servir d'instruments de détermination des différents coefficients spécifiques à ce type de problème. Les résultats expérimentaux apporteront par la suite des informations qualitatives sur ce type d'écoulements, permettant d'évaluer la pertinence des résultats numériques obtenus.

L'objectif principal de cette recherche consiste à explorer cette voie en vue d'en évaluer la faisabilité et les limites en relation avec une base de données expérimentales fournie par des essais d'écoulements.

Étude expérimentale

Le bâti d'expérimentation mis au point permet de réaliser des écoulements granulaires secs monodisperses fortement dilatants, dans différentes configurations. Constitué d'un réservoir amont surélevé débouchant dans un canal incliné dont la nature du fond et l'inclinaison sont variables, ce dispositif permet de mettre en vitesse une population de particules et de la suivre au cours du mouvement.

Dispositif expérimental

Canal d'écoulement

Le canal d'écoulement ($L = 250$ cm, $l = 7$ cm, $h = 50$ cm) repose sur un support permettant de faire varier l'inclinaison de 20° à 50° (fig. 1). Un réservoir amont, fixé dans le prolongement du canal, permet de stocker les particules. Le débit

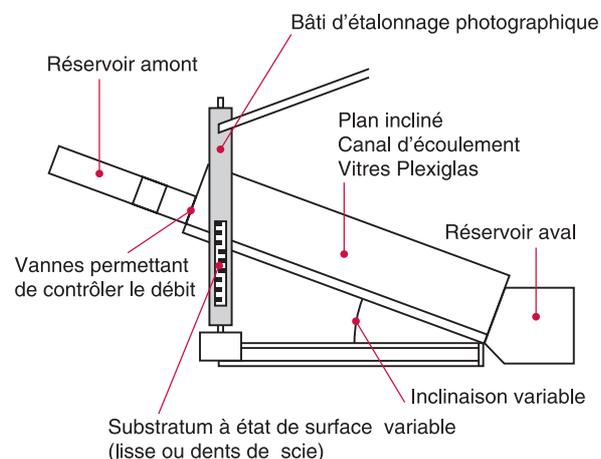


Fig. 1 - Canal ouvert à inclinaison variable.

d'alimentation est contrôlé par l'intermédiaire de deux portes métalliques verticales s'ouvrant latéralement sur le milieu du canal.

Prise de vue

La prise de vue est réalisée selon un mode d'enregistrement photographique à double flash, par surimpression des images aux instants t_1 et $t_1 + \Delta t$. Dans le cas d'écoulements plus denses, un mode de prise de vue vidéo à double caméra standard (25 images/s) est utilisé. Les déclenchements des deux caméras sont volontairement désynchronisés (d'environ 10 ms) de manière à obtenir deux séries d'images décalées dans le temps (fig. 2).

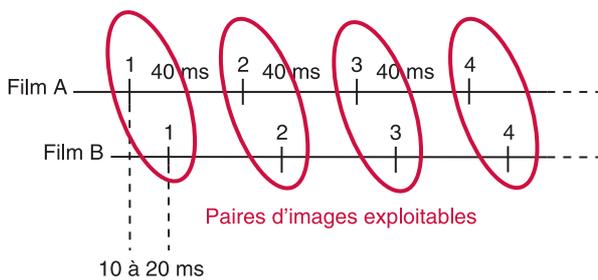


Fig. 2 - Prise de vue à double caméra standard.

Matériau granulaire utilisé

Dans le but d'engendrer des écoulements granulaires fortement dilatants, on utilise des particules de forme irrégulière (pois chiches calibrés de taille moyenne 10 mm). Ces particules ont été colorées afin de faciliter leur suivi dans l'écoulement. Les caractéristiques moyennes de ce type de matériau sont les suivantes :

$$m_{\text{particule}} = 0,744 \text{ g}$$

$$\rho_{\text{particule}} = 1,797 \text{ kg/dm}^3$$

$$\rho_{\text{milieu granulaire}} = 0,971 \text{ kg/dm}^3$$

compacité maximale d'un empilement ordonné :

$$c_{\text{max}} = 0,54$$

compacité maximale d'un empilement désordonné :

$$c_{\text{max}} = 0,47$$

Résultats expérimentaux

L'étude expérimentale a été conduite selon un plan d'expérience permettant une étude paramétrique de l'influence des principaux paramètres expérimentaux (inclinaison du canal, nature et rugosité du fond, débit notamment) sur les caractéristiques de l'écoulement granulaire.

Les paramètres principaux des différentes expériences peuvent être synthétisés dans le tableau ci-dessous (tableau I). Pour chaque nature de fond (dents de scie DS, lisse carrelage LC et lisse bois LB), les profils moyens des grandeurs caractéristiques ont été établis pour différentes inclinaisons en tenant compte des contraintes expérimentales ($\alpha = 21,7^\circ$ étant trop faible pour engendrer un écoulement dilatant sur les fonds rugueux ; $\alpha = 31,1^\circ$ créant des écoulements rapides et denses dont les clichés en surimpression sont difficilement exploitables). Les valeurs moyennes sont déterminées par tranches de hauteur 1 diamètre.

Le fond en dents de scie (DS) est constitué d'une crémaillère en bois dont les dents sont orientées dans le sens de l'écoulement de manière à ne pas provoquer un blocage de l'écoulement dès la sortie du réservoir.

Profils de compacité

Les différents profils obtenus sont caractérisés par un déficit de compacité à la paroi (couche de paroi) et un maximum de compacité à mi-hauteur (fig. 3), ce qui est une des caractéristiques du régime « bouchon » décrit par Azanza [1].

Le comportement dilatant de l'écoulement est sensible à la nature et à la rugosité du fond utilisé. En effet, la bonne restitution élastique du fond lisse dur LC et les mécanismes de rotation induits par la macro rugosité du fond DS, favorisent la dilatance au sein de l'écoulement. On note également l'influence de l'inclinaison. Dans les cas DS et LC, la hauteur de la veine augmente avec l'inclinaison contrairement au cas LB dans lequel la veine se compacte. Les cas DS et LC représentent donc les cas d'écoulements les plus dilatants.

TABLEAU I
Matrice des essais

	Série 2	Série 3	Série 4	Série 6	Série 5	Série 7	Série 10	Série 8	Série 9
Inclinaison (°)	21,7	25	28,1	25	28,1	31,1	25	28,1	31,1
Nature du fond	LC	LC	LC	DS	DS	DS	LB	LB	LB
Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)	2,183	2,759	3,036	1,792	2,006	2,510	2,312	2,625	3,015
Agitation moyenne de l'écoulement (m/s)	0,483	0,419	0,460	0,542	0,674	0,708	0,440	0,445	0,474

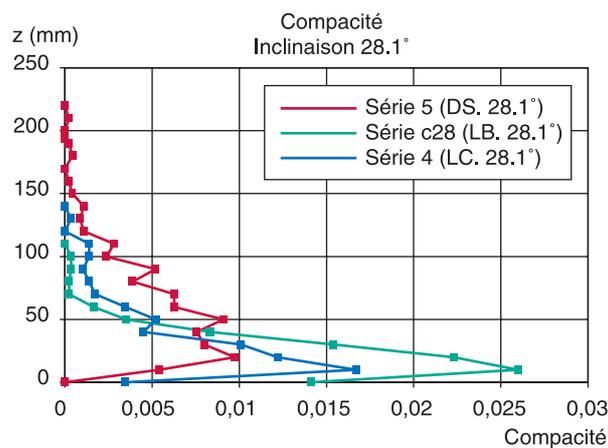
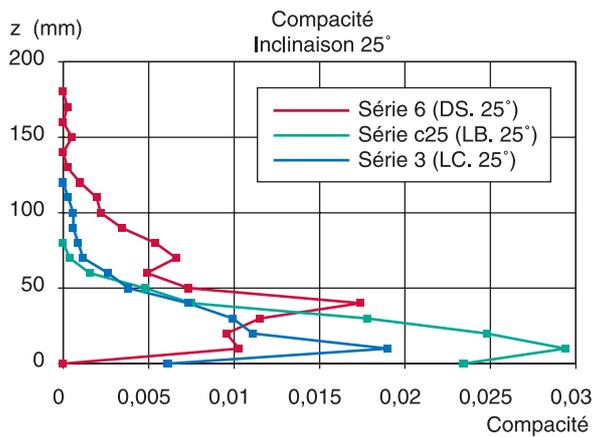


Fig. 3 - Profils de compacité.

Profils de vitesse moyenne

Les profils de vitesse moyenne (fig. 4) sont caractérisés par des vitesses de glissement élevées au voisinage du fond (*cf.* régime bouchon). La vitesse moyenne augmente avec l'inclinaison du canal. Elle est également sensible à la nature et à la rugosité du fond. Dans les cas LB et DS, celle-ci augmente avec la hauteur dans l'écoulement contrairement au cas LC où l'on observe une diminution en fonction de l'altitude. Dans ce dernier cas, qui

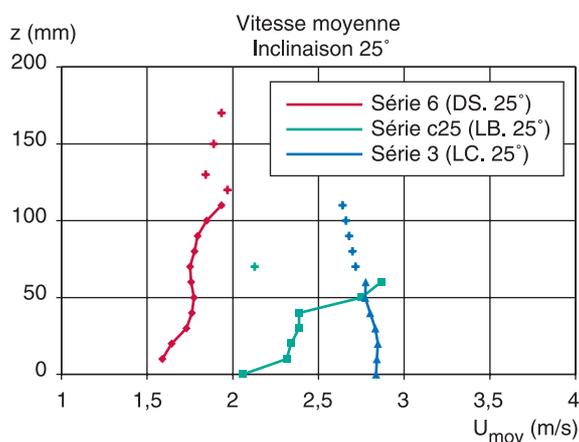


Fig. 4 - Profils de vitesse moyenne.

donne lieu à des écoulements dilatants et où la population est plus homogène en vitesse, les variations de vitesse sont essentiellement dues à des échanges entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle.

Profils de température granulaire

La température granulaire [4] est définie en dimension 2 par la relation :

$$T = \langle \mathbf{u}'^2 \rangle / 2 \quad (2.1)$$

Celle-ci représente une énergie cinétique d'agitation par unité de masse où $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \langle \mathbf{u} \rangle$ est la vitesse d'agitation d'une particule (\mathbf{u} étant la vitesse totale de la particule et $\langle \mathbf{u} \rangle$ la vitesse moyenne de l'écoulement dans la tranche d'altitude considérée).

Les différents profils de température granulaire établis font apparaître une influence prépondérante de la rugosité du fond. L'agitation moyenne augmente avec la rugosité telle que $\bar{T}_{DS} \gg \bar{T}_{LB} > \bar{T}_{LC}$.

Dans les deux cas les plus dilatants DS et LC, la température granulaire augmente avec la hauteur dans l'écoulement (fig. 5 pour le cas LC) du fait des mécanismes de rotation (DS) et de restitution élastique (LC). Dans le cas LB qui génère des écoulements faiblement dilatants, la température granulaire diminue avec la hauteur.

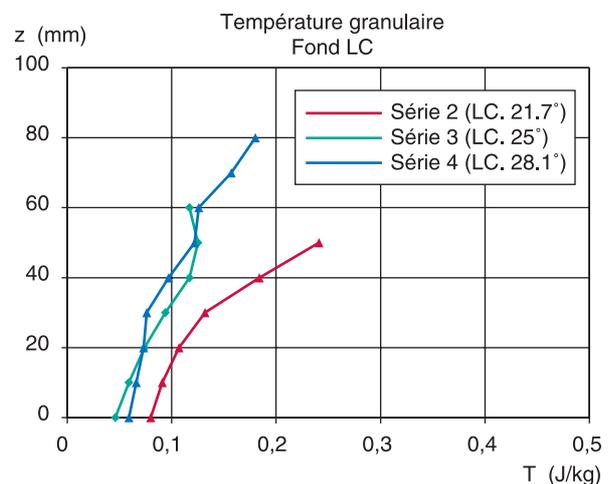


Fig. 5 - Profils de température granulaire.

Définition d'une « pseudo loi d'état » caractéristique

L'étude des différents profils obtenus fait apparaître une variation des grandeurs caractéristiques avec la hauteur dans l'écoulement. On observe notamment, au-dessus de la couche de paroi, une diminution de la compacité quand la hauteur augmente.

De même, les cas les plus dilatants (DS et LC) où la compacité diminue avec la hauteur dans l'écoulement, sont caractérisés par une augmentation de la température granulaire au sein de l'écoulement. La compacité subit une décroissance complémentaire associée à l'accroissement de la température granulaire.

Ces observations ont conduit à faire le choix d'une hypothèse simple de décroissance de type hyperbolique en z et en T , au-dessus du maximum de compacité (z étant la variable locale qui représente la hauteur dans l'écoulement). L'hypothèse de travail retenue dans l'étude numérique est de la forme :

$$c = \frac{c_0}{(1 + k_1 z)(1 + k_2 z)} \quad (2.2)$$

Pour l'étude de la dynamique d'écoulement du « pseudo fluide » considéré ici, une relation de cette forme exprimée en terme de masse volumique tient lieu de loi d'état dans le système d'équations des milieux continus.

Étude numérique

Cette étude numérique vise à évaluer la pertinence d'une approche d'homogénéisation pour le milieu étudié. L'écoulement du matériau granulaire est considéré comme celui d'un « pseudo fluide » aux caractéristiques particulières. La phase dynamique de ces avalanches de grains est désignée par le terme « écoulement granulaire ». Dans cette hypothèse, le mouvement du milieu granulaire est décrit au moyen des équations de la mécanique des fluides (résolues avec le code FIDAP) en tenant compte de son état particulaire spécifique responsable de la dilatance. Pour cela, il faut coupler au système d'équations continues décrivant l'écoulement, une loi d'état non classique de la forme expérimentale traduisant le caractère dilatant du milieu.

Concepts de modélisation

Le milieu granulaire étudié est assimilé à un fluide compressible monophasique, non newtonien. Le système d'équations de type Navier-Stokes bidimensionnel, résolu par le code de calcul utilisé ici, est constitué des équations suivantes :

Équation de continuité :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (3.2)$$

Équation de conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \boldsymbol{\sigma} : \operatorname{grad} \mathbf{u} - \operatorname{div} \mathbf{q} + \beta T \frac{dp}{dt} + p \operatorname{div} \mathbf{u} \quad (3.3)$$

où $\mathbf{u}(u_x, u_z)$ est le vecteur vitesse,

$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}$ le tenseur des contraintes avec

$\boldsymbol{\tau} = \left(\kappa - \frac{2}{3}\mu \right) \operatorname{div} \mathbf{u} \cdot \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{D}$ le tenseur des contraintes visqueuses (μ et κ étant des coefficients de viscosité), β le coefficient de compressibilité, C_p la chaleur spécifique à pression constante, \mathbf{q} le flux de chaleur, p la pression du fluide, et T est interprétée comme la température granulaire.

Pseudo équation d'état

Les essais d'écoulement réalisés en canal incliné permettent de mettre en évidence des variations importantes de masse volumique du « fluide granulaire », conduisant à une loi d'état reliant la masse volumique du milieu à l'agitation particulaire (par l'intermédiaire de la température granulaire) mais également à la hauteur dans l'écoulement z mesurée par rapport au substratum. On supposera que T obéit à une équation classique de conservation de l'énergie. La variation spatio-temporelle des propriétés du milieu définies par sa loi d'état, permet de représenter des zones de densité variable c'est-à-dire *denses* dans l'écoulement « solide », *de moins en moins denses* vers l'extérieur de celui-ci et *diluées* loin de l'écoulement.

Cette variation de la masse volumique du milieu, décroissante en fonction de z et T , est exprimée par la relation suivante :

$$\rho = \alpha \rho_{\text{dense}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{dilué}}$$

$$\text{où} \quad \alpha = \frac{1}{(1 + k_1 z)(1 + k_2 T)} \quad (3.4)$$

avec α le taux de présence de solide ($\alpha = 0$ correspond à un écoulement dilué où la température granulaire est élevée, et $\alpha = 1$ correspond à un écoulement dense où la température granulaire est faible).

k_1 et k_2 sont des constantes, z la hauteur dans l'écoulement, ρ_{dense} la masse volumique apparente dans la zone dense (particules à leur compacité maximale), $\rho_{\text{dilué}}$ la masse volumique dans la zone diluée.

Le choix d'une hypothèse de loi d'état de ce type nous permet dans le cadre de la modélisation

numérique d'étudier un milieu monophasique évolutif et non deux phases distinctes (solide et air). On considère ainsi globalement l'écoulement granulaire lui-même et son milieu environnant. La valeur de la masse volumique, à la position $P(x,z)$ et à l'instant t , nous renseigne sur la composition de l'écoulement : milieu dense (ρ élevé), milieu dilué (ρ faible) ou milieu plus ou moins dense (valeurs intermédiaires de ρ). En particulier cette approche pourrait permettre de prendre en compte parallèlement à la propagation de la partie dense de l'écoulement, des effets induits importants dans ce type de phénomène tels que le dégagement de poussières ou les mouvements de la zone la plus diluée précédant le corps de l'éboulement que l'on définit comme étant l'effet de souffle.

Résolution numérique

Le domaine de calcul considéré (fig. 6) représente un espace bidimensionnel borné de grandes dimensions, comportant à la partie inférieure un plan incliné à deux pentes sur lequel s'effectue un écoulement gravitaire.

Le domaine a été maillé à l'aide d'éléments de type « quadrilatère à 9 nœuds », dont les dimensions varient de façon à resserrer le maillage dans les zones concernées par l'écoulement.

Conditions aux limites

L'entrée de matière se fait entre les points 1 et 4, par un profil de vitesse constant de très forte composante verticale afin de représenter l'effondrement de la masse rocheuse juste après la rupture.

La loi d'état conduit à une température très faible (faible agitation) dans les zones denses constituées en majorité de roche et une température très élevée (forte agitation) dans les zones diluées où l'air est majoritaire.

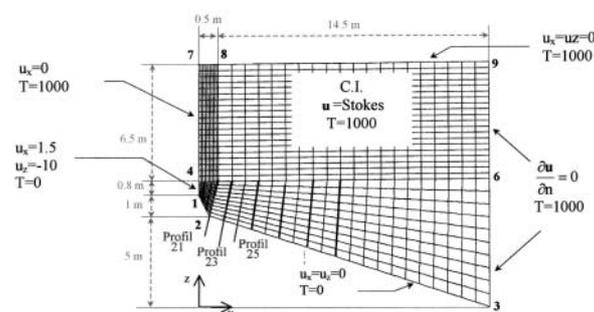


Fig. 6 - Domaine de calcul.

Conditions initiales

Le champ de vitesse à l'intérieur du domaine est initialisé par un calcul de Stokes, afin de démarrer les calculs suivants à partir d'un champ « convergé ».

Les conditions initiales en température correspondent à un milieu dilué sur l'ensemble du domaine étudié. La loi d'état conduit à une température granulaire élevée.

Traitement numérique

Le traitement numérique se fait à l'aide d'un code de calcul de dynamique des fluides par éléments finis FIDAP, retenu pour son adaptabilité, permettant ainsi la modification de la forme de la loi d'état. Le système d'équations est traité à l'aide d'un schéma de résolution par correction de pression. Les constantes utilisées dans l'équation d'état (3.4) sont telles que $\rho_{\text{dense}} = \rho_{\text{éboulis}} = 2\,000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{dilué}} \approx \rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ et $k_1 = k_2 = 10^{-2}$.

Résultats numériques

Les résultats numériques obtenus se présentent en deux parties. La phase 1 (fig. 7) simule l'effondrement d'une masse rocheuse durant 0,36 seconde (alimentation sur le bord 1-4). Le calcul est alors relancé en utilisant comme conditions initiales, l'état final du calcul précédent (à $t = 0,36 \text{ s}$), mais en supprimant la condition aux limites en vitesse entre les points 1 et 4. La phase 2 (fig. 8) représente alors la progression de la masse éboulée le long du plan incliné. L'écoulement se poursuit ainsi pendant 0,35 seconde. Les matériaux éboulés s'étalent progressivement le long de la pente. Toutefois des difficultés de convergence rencontrées au-delà du pas de temps $t = 0,705 \text{ s}$ n'ont pas permis d'atteindre l'arrêt naturel de la propagation, le code étant utilisé à la limite de son domaine d'application.

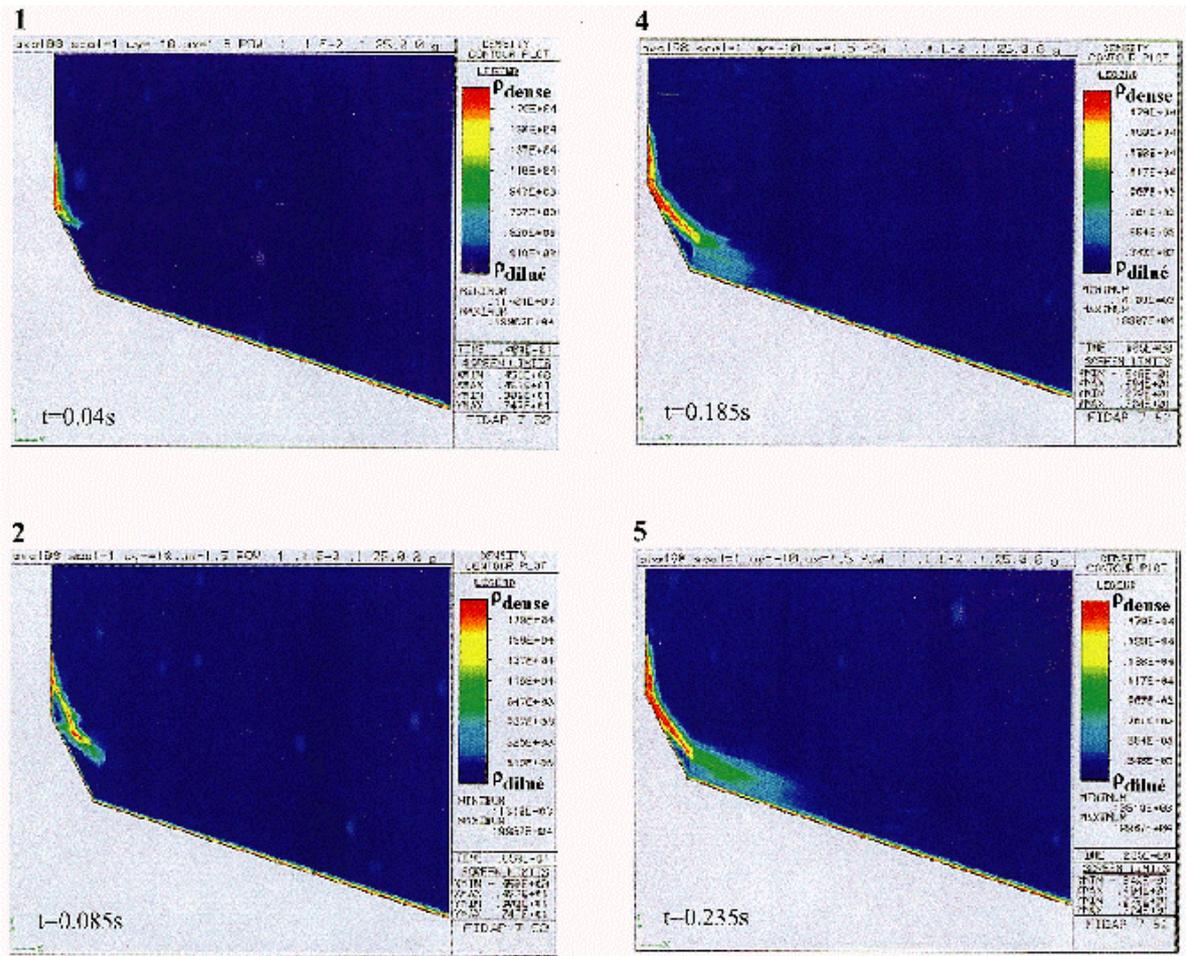
Les résultats numériques obtenus dans les conditions de calcul décrites précédemment sont visualisés sous forme d'un zonage en couleur iso-masse volumique et permettent de suivre l'évolution du milieu au cours du temps.

Les graphiques suivants (fig. 7 et 8) font apparaître un fort gradient vertical de masse volumique. L'écoulement ne possède pas de frontière libre distincte. Le passage entre le corps de l'avalanche et le milieu environnant est continu et progressif.

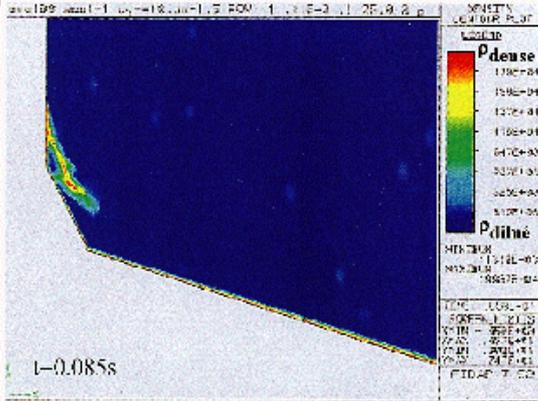
On note la présence d'une zone de très faible masse volumique entourant le corps de l'écoulement qui correspond à la présence de matière solide diluée assimilable à un dégagement de poussières.

Il existe également une large zone très diluée précédant l'écoulement et dont les vitesses sont de l'ordre de celles de l'écoulement dense, que l'on définit comme étant l'effet de souffle accompagnant les éboulements rocheux de grande ampleur.

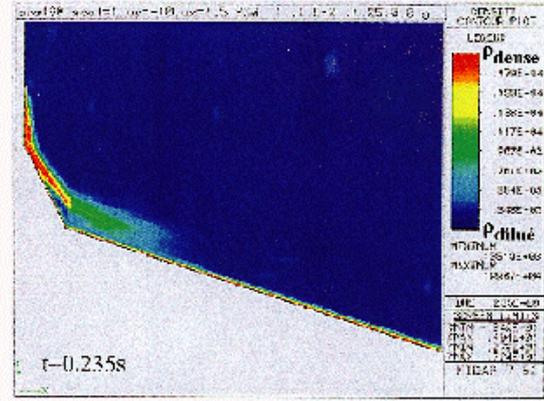
Fig. 7 - Écoulement Phase 1.



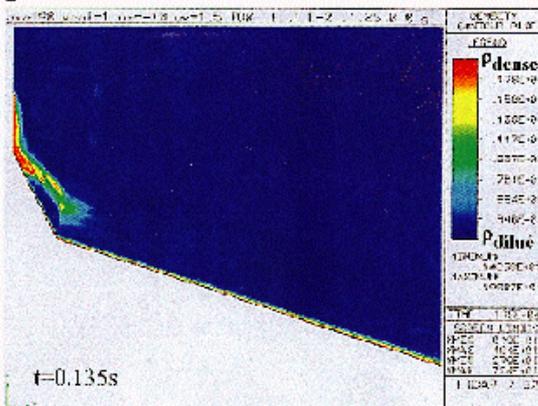
Web 2



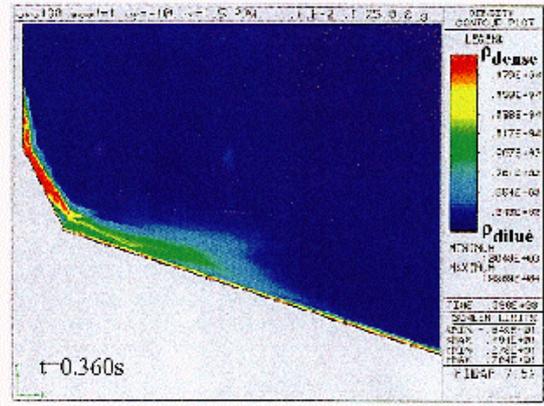
5



3



6



Il faut souligner l'intérêt de pouvoir analyser les effets induits qui accompagnent les grands mouvements de terrains, notamment l'effet de souffle qui représente un facteur important dans l'évaluation et la prévention du risque.

Les limites d'utilisation du code de calcul ne permettant pas d'imposer directement des échelles de longueur représentatives de phénomènes réels, on établit alors des correspondances d'échelles entre le modèle numérique et les phénomènes réels au travers de relations de similitude. Pour un rapport d'échelle de 100, l'écoulement simulé correspond à un éboulement en grande masse (volume supérieur à 1 hm^3).

Validation de la démarche d'homogénéisation

Comparaison des profils numériques et expérimentaux

Afin de valider la démarche d'homogénéisation, on procède à une comparaison des résultats numériques et expérimentaux.

Les profils numériques utilisés ici (Profil 21, 23 et 25) (fig. 9), sont situés sur la seconde pente du

domaine (zone d'écoulement établi) où les conditions d'écoulement sont les plus proches des conditions expérimentales. L'analyse des différents profils se fait sur des grandeurs sans dimension, les variables étudiées n'évoluant pas dans les mêmes plages de valeurs dans l'application numérique et dans l'expérience. Les grandeurs caractéristiques telles que la compacité (masse volumique), la vitesse et la température granulaire ont été rendues adimensionnelles par les valeurs maximales. La hauteur a été adimensionnée par une hauteur caractéristique (mesurée par rapport au sol) correspondant à 90 % de la masse des matériaux.

Profils de compacité

Pour les trois types de fonds, on note une bonne correspondance des profils numériques et expérimentaux, avec toutefois un meilleur accord dans les zones les plus éloignées du changement de pente (écoulement établi) (fig. 9).

Profils de vitesse

Les profils numériques de vitesse présentent un désaccord avec les profils expérimentaux, au niveau du sol et de la frontière libre, dû à la différence des conditions aux limites (fig. 10). En

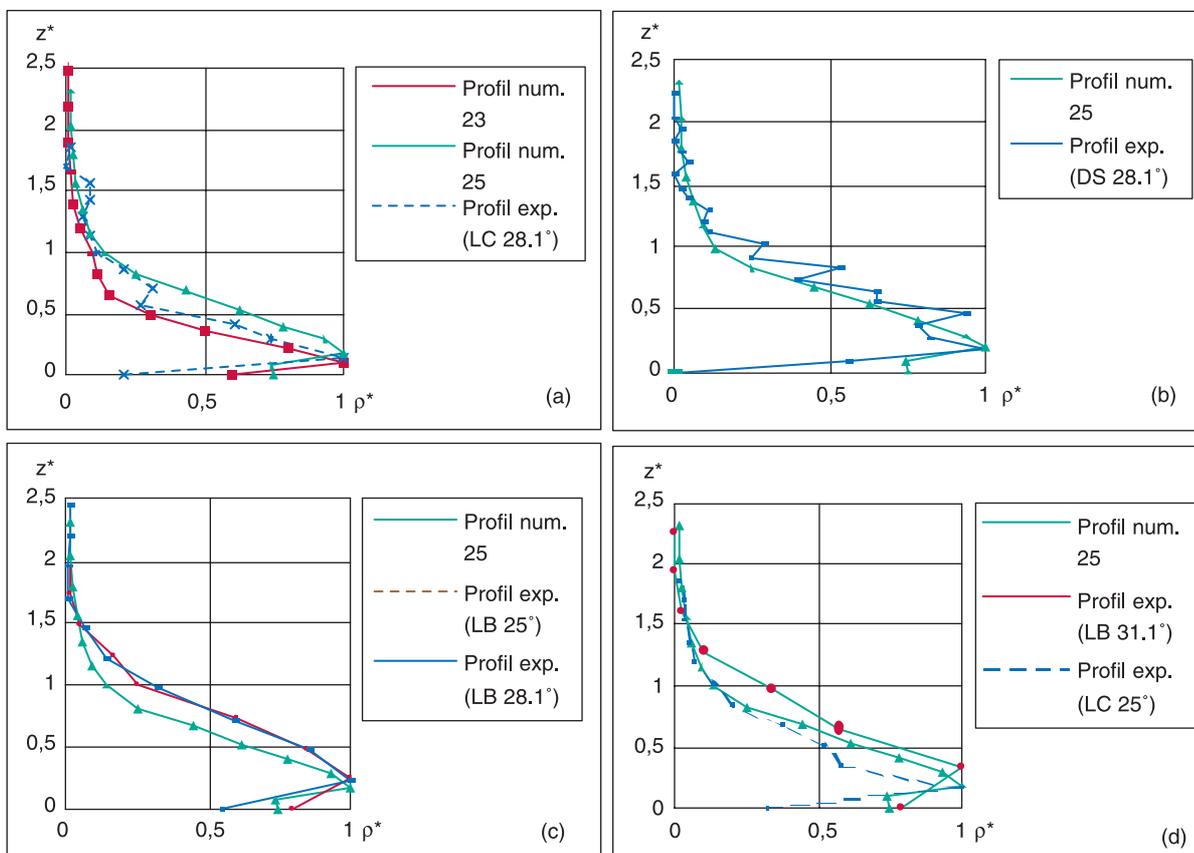


Fig. 9 - Comparaison des profils numériques et expérimentaux de compacité.

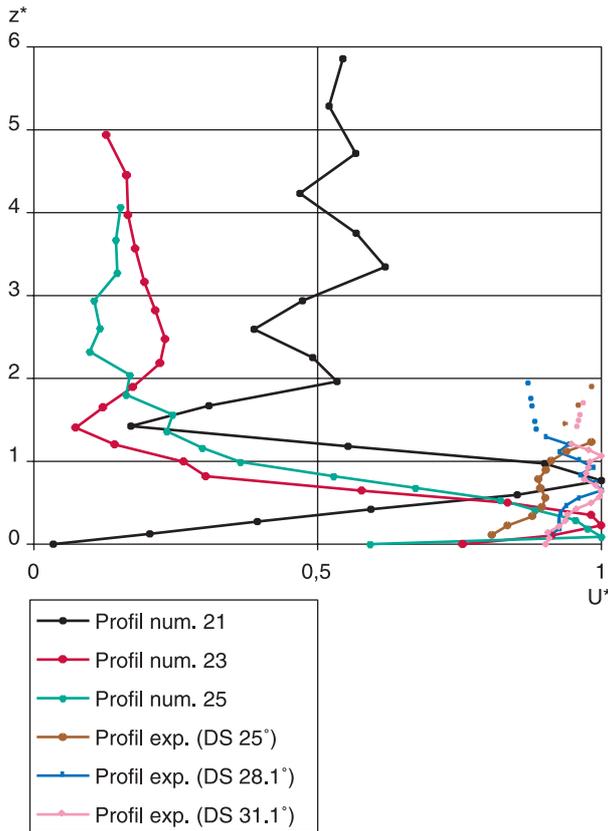


Fig. 10 - Comparaison des profils numériques et expérimentaux de vitesse moyenne.

effet, la vitesse imposée dans le modèle numérique au niveau du sol est nulle contrairement au cas expérimental où il existe une vitesse de glissement élevée à la paroi. Au niveau de la frontière libre, le désaccord observé est dû à la différence de modes de dissipation d'énergie. Dans le cas numérique, la transition entre le corps de l'avalanche et l'air étant continue, le freinage se fait de manière progressive par cisaillement entre les couches voisines de masse volumique différente. Dans le cas expérimental, l'écoulement granulaire étant monodisperse, le freinage se fait au travers des collisions. Dans la zone supérieure peu dense où les trajectoires balistiques sont indépendantes, on observe peu de collisions donc peu de freinage contrairement au cas numérique.

Profils de température granulaire

On observe une assez bonne correspondance des profils de température granulaire dans les cas les plus dilatants où la température augmente avec la hauteur dans l'écoulement (fig. 11), du fait des mécanismes de rotation (cas DS) et de la bonne restitution élastique (cas LC).

Analyse de la « pseudo loi d'état »

La bonne correspondance observée entre les profils de compacité expérimentaux et numériques

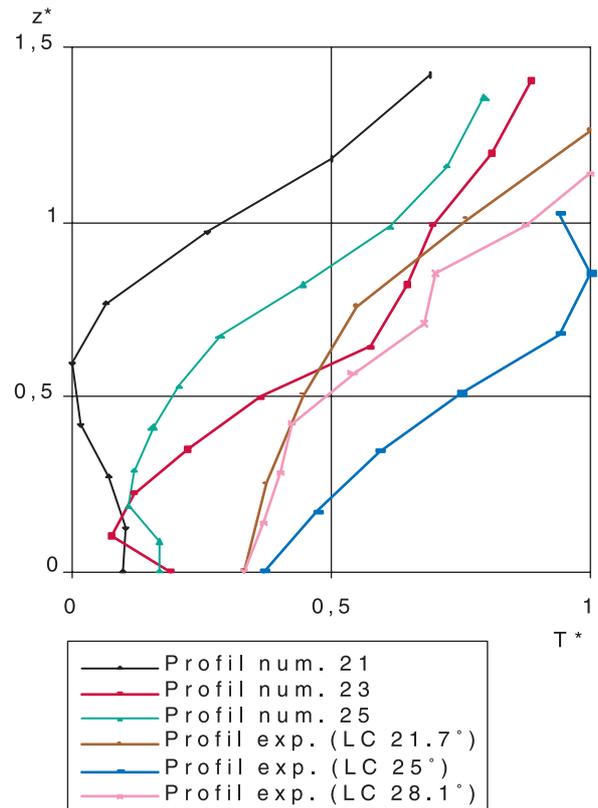


Fig. 11 - Comparaison des profils numériques et expérimentaux de température granulaire.

nous conduit à rechercher une corrélation entre les valeurs de compacité mesurées et des valeurs de compacité calculées par l'intermédiaire de l'équation d'état utilisée dans l'application numérique. Ces valeurs de compacité calculées sont obtenues en injectant les valeurs expérimentales de hauteur et température dans l'expression de la « pseudo loi d'état » numérique :

$$c_{cal} = \frac{c_0}{(1 + k_1 z_{mes})(1 + k_2 T_{mes})} \stackrel{?}{=} c_{mes}$$

Pour cela il faut déterminer k_1 et k_2 correspondant au cas expérimental ainsi que la valeur de la compacité maximale c_0 .

Les valeurs expérimentales de référence de k_1 et k_2 sont déterminées de manière à assurer la correspondance d'échelle entre les cas numériques et expérimentaux. Cette correspondance est obtenue en considérant une variation identique des termes $1/(1 + k_1 z)$ et $1/(1 + k_2 T)$ dans l'épaisseur de la zone d'écoulement entre les deux modèles :

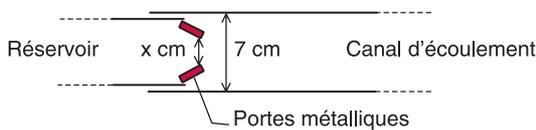
$$\frac{1}{1 + k_{1num} H_{0num}} = \frac{1}{1 + k_{1exp} H_{0exp}} \Rightarrow \frac{k_{1exp}}{k_{1num}} = \frac{H_{0num}}{H_{0exp}}$$

$$\frac{1}{1 + k_{2num} \Delta T_{0num}} = \frac{1}{1 + k_{2exp} \Delta T_{0exp}}$$

$$\Rightarrow \frac{k_{2exp}}{k_{2num}} = \frac{\Delta T_{0num}}{\Delta T_{0exp}}$$

La compacité maximale c_0 dans les écoulements expérimentaux est déterminée en tenant compte de l'effet de dilution géométrique dû à l'augmentation de largeur à la sortie du réservoir d'où $c_0 < 0,47$ ($c_0 = 0,47$ pour un empilement désordonné).

En fonction de l'ouverture des portes, la valeur de c_0 est déterminée pour chaque nature de fond, par la relation : $c = 0,47 \frac{x}{7}$.



La comparaison entre les valeurs de compacité mesurée et de compacité théorique calculées selon la loi d'état a été effectuée pour chaque nature de fond (fig. 12 pour le cas dents de scie (DS)). De manière générale, on observe une assez bonne corrélation d'ensemble (pente « 1, dispersion assez faible) dans le corps de l'écoulement pour les deux cas les plus dilatants (DS et LC). La corrélation est moins bonne dans les zones limites A

et B (respectivement au sol et à la frontière libre). Dans le cas faiblement dilatant (LB), la corrélation est médiocre dans le corps de l'écoulement et meilleure dans les zones limites.

La forme de la loi d'état utilisée apparaît ainsi assez représentative pour les cas les plus dilatants (DS et LC). *Les résultats obtenus à la fois sur le plan expérimental et numérique soulignent l'intérêt de la démarche d'homogénéisation et permettent d'établir sa faisabilité.*

Conclusion

Les éboulements rocheux en grande masse constituent un risque naturel majeur contre lequel il n'existe aucune solution technique de parade.

L'étude des phénomènes physiques complexes mis en jeu constitue une démarche pluridisciplinaire visant à répondre à deux questions essentielles concernant la dynamique de propagation et l'extension des dépôts. Dans ces domaines, de nombreuses études expérimentales et numériques ont vu le jour depuis de nombreuses années sans toutefois apporter de solution satisfaisante.

La démarche adoptée dans cette étude se place d'un point de vue de l'ingénieur, cherchant à obtenir rapidement un outil permettant de traiter le problème particulier des éboulements rocheux en grande masse. On ne cherche pas ici à écrire de nouvelles théories en termes mathématiques ni à étudier précisément les écoulements granulaires, mais à réutiliser les outils de la dynamique des fluides.

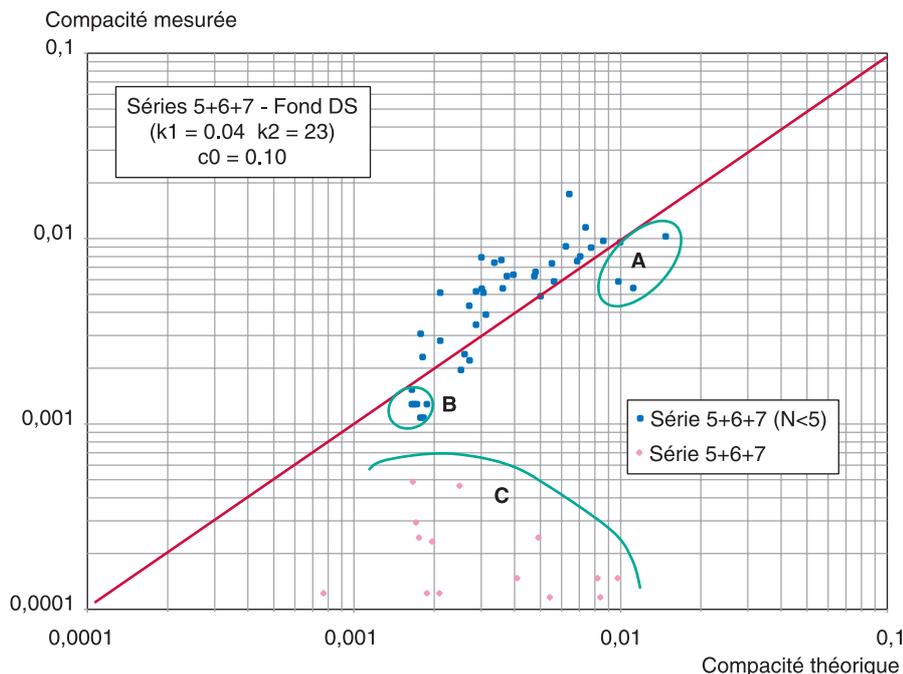


Fig. 12 - Corrélation entre les valeurs de compacité mesurées et calculées (Fond DS).

des en intégrant certains aspects issus de la mécanique des milieux granulaires. Cette étude repose sur une approche de modélisation numérique dans laquelle on assimile l'éboulement rocheux à l'écoulement d'un milieu continu monofluide auquel des propriétés particulières confèrent un caractère granulaire (par l'intermédiaire d'une pseudo loi d'état), démarche encore non rencontrée dans la bibliographie. Les expériences d'écoulement sont nécessaires pour clarifier certaines idées et conforter les résultats numériques obtenus.

L'observation de la dynamique d'écoulements granulaires fortement dilatants (régime bouchon) met en avant le rôle déterminant de la dilatance (reliée à la température granulaire) dans la propagation. Les différentes expériences ont permis finalement de poser une hypothèse simple de loi d'état exprimant la décroissance de la masse volumique en fonction de la hauteur dans l'écoulement et de la température granulaire.

L'étude de modélisation numérique a permis de conclure à la faisabilité d'une approche dans laquelle on considère le milieu granulaire dilatant et son milieu environnant comme un fluide équivalent monophasique doté d'une loi d'état de la forme expérimentale. La modélisation par un monofluide devrait permettre un traitement global donnant accès à l'analyse des phénomènes induits tels que le dégagement de poussière et l'effet de souffle. Il faut toutefois souligner les difficultés d'adaptation des codes de calculs existants à la modélisation de ce type d'écoulement.

Les différents résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont permis l'identification de pistes qu'il semble intéressant de poursuivre. Cette étude permet de conclure à l'intérêt d'une approche par milieu continu, mais ne constitue pas en elle-même un modèle de simulation des avalanches en grande masse. Dans le cadre de l'étude de modélisation numérique, il serait intéressant d'approfondir l'approche d'homogénéisation, ce qui nécessite le développement d'outils de calcul spécifiques.

L'étape suivante de cette démarche consiste donc à proposer un système d'équations, semblable à celui imposé par FIDAP, intégrant les modifications permettant de traduire le comportement dilatant des éboulements rocheux en grande masse. Cette étape passe par la détermination du tenseur des contraintes et des équations de conservation de la masse et de l'énergie pour ce type d'écoulement.

Parallèlement, des essais d'écoulement complémentaires pourraient permettre d'affiner la définition de la pseudo loi d'état intégrant la dilatance, par des moyens expérimentaux plus importants et des configurations d'essais différentes (débit, géométrie, rugosité, etc.), mais également d'identifier et de déterminer certains coefficients propres à ce type de milieu.

Ces deux étapes sont complémentaires et nécessaires pour faire progresser la modélisation numérique et l'élaboration d'outils de calcul spécifiques à ce type de phénomène.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AZANZA E. (1998), *Écoulements granulaires bidimensionnels sur un plan incliné*, Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC Paris).
- [2] AZZONI A., CHIESA S., FRASSONI A., GOVI M. (1992), The Val Pola Landslide. *Engineering Geology*, **33**, pp. 59-70.
- [3] BESSON L. (1996), *Les risques naturels en montagne*. Artès Publialp.
- [4] CAMPBELL C.S. (1990), Rapid granular flows. *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, **22**, pp. 57-92.
- [5] BAGNOLD R.A. (1954), *Experiments on a gravity-free dispersion of large spheres in a newtonian fluid under shear*. Proc. Roy. Soc. of London, A225, pp. 49-63.
- [6] DAVIES T.R.H. (1993), *Models for disastrous mass movements*. In : Proceedings of the « Pierre Beghin » international Workshop on Rapid Gravitational Mass Movements, Cemagref, pp. 67-72.
- [7] DRAKE T.G. (1990), *Structural features in granular flows*. *Jour. Of Geophysical Research*, **95**(B6), pp. 8681-8696.
- [8] DRAKE T.G., WALTON O.R. (1995), *Comparison of experimental and simulated grain flows*. *Jour. Of applied Mechanics*, **62**, pp. 131-135.
- [9] ROCHET BOUZID I. (1999), *Contribution à l'étude des écoulements granulaires appliqués aux avalanches rocheuses en grande masse*. Thèse de l'Université Lyon I.
- [10] SAVAGE S.B. (1989), *Flow of granular materials*. Theoretical and applied Mechanics, pp. 241-266.
- [11] SCHEIDEGGER A.E. (1973), *On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*. *Rock Mechanics*, **5**, pp. 231-236.
- [12] SCHINDLER C., ROULLER J.D., TRIPLET J.-P., CUENOD Y. (1991), *Les éboulements de Randa des 18 avril et 9 mai 1991*. In : Sympto-

sium Contribution des ingénieurs européens à la prévention des catastrophes naturelles, Lausanne.

[13] SAVAGE S.B. (1998), *Analyses of slow high-concentration flows of granular materials*. *Jour. Of Fluid Mechanics*, **377**, pp. 1-26.

[14] SAVAGE S.B, HUTTER K. (1989), *The motion of a finite mass of granular material down a rough incline*. *Jour. Of Fluid Mechanics*, **199**, pp. 177-215.

ABSTRACT

A “monofluid” homogenization approach for highly dilatant dry granular flows. Application to massive rockfalls

I. ROCHET-BOUZID

Forecasting the reach of massive rockfalls is a vital question for risk prevention. This research is a contribution to modelling studies of these phenomena. For this purpose we have considered highly dilatant dry granular mono-disperse flows.

In order to understand the propagation mechanisms an experimental study of flow in a chute was conducted using irregularly shaped particles. The experimental results highlight the importance of the agitation (granular temperature) which is responsible for flow dilatance. On the basis of these observation a general characteristic state law has been developed.

The feasibility of a numerical homogenisation approach has also been examined with reference to a single phase “pseudofluid” with a state law similar to that derived from the experiment. Comparison between the numerical and experimental results confirms the feasibility of the approach, but also the possible benefit of monofluid modelling with regard to analysis of the induced phenomena (dust, air blast).