

CETE Lyon

REGION RHONE-ALPES

CONTRAT DE PLAN ETAT REGION RHONE-ALPES

PROGRAMME "RISQUES NATURELS"

CONTRIBUTION A LA MODELISATION DES GRANDS EBOULEMENTS ROCHEUX

Opération n° E092359504

**CETE Lyon (Coordinateur)¹,
LMFA - URA CNRS 263 - ECL - UCB Lyon I²,
CEMAGREF (Grenoble)³,
LIRIGM (UJF Grenoble)⁴.**

1 - RAPPEL DES OBJECTIFS

Les mouvements de terrain représentent un risque naturel très largement répandu. Selon la nature des terrains, les conditions hydrogéologiques et climatiques, la topographie, ils peuvent prendre des formes et des dimensions diverses (éboulements, glissements, laves torrentielles, ...). Leur vitesse d'évolution peut être très largement variable d'un phénomène à un autre en fonction de la nature des mécanismes mis en jeu, de leur degré d'évolution et des conditions particulières du site. En particulier cette évolution peut s'accompagner d'une divergence vers une phase terminale à dynamique rapide.

C'est notamment le cas pour les grands éboulements rocheux (volume supérieur à 1 million de mètres cubes) dont les effets destructeurs, les dommages directs et indirects potentiels et la gravité de la menace qu'ils représentent pour les zones exposées dépendent étroitement des volumes et des conditions de propagation et de dépôt des matériaux éboulés.

¹ Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon

² Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique - Unité de Recherche Associée au CNRS 263
Ecole Centrale de Lyon - Université Claude Bernard Lyon I

³ Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Eaux et Forêts

⁴ Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique - Université
Joseph Fourier - Grenoble

Ces éléments conditionnent notamment :

- la détermination des limites d'extension de l'éboulement et la délimitation des zones de risque et des périmètres de sécurité,
- les modifications morphologiques induites par l'éboulement sur le versant et dans le fond de la vallée, et en particulier l'éventualité de la formation d'un barrage naturel obstruant tout ou partie de la vallée,
- la fragmentation, la blocométrie et la répartition des matériaux produits par l'éboulement au sein de l'éboulis en liaison avec les données géologiques et l'état de fracturation naturelle du massif, dont dépendent la stabilité, la vulnérabilité et le risque d'effacement du barrage naturel.

Le programme de recherche qui a été développé a eu pour objectif d'améliorer la connaissance et la compréhension de ces mécanismes encore mal connus suivant trois axes d'étude principaux :

- mise au point d'une méthodologie d'observation et de description objectives des données phénoménologiques issues de l'analyse d'un ensemble de cas et de sites de grands éboulements rocheux bien documentés, et constitution d'une base de données utilisable pour les études de modélisation,
- détermination des améliorations et des adaptations possibles à apporter aux outils de simulation actuels ou en cours de développement dans le domaine des éboulements rocheux et des avalanches,
- développement des recherches théoriques et expérimentales sur la modélisation des écoulements granulaires et la mise au point d'outils numériques de simulation adaptés à l'étude des grands éboulements rocheux.

2 - RESULTATS PRINCIPAUX OBTENUS

Les résultats principaux des études conduites dans le cadre de ce projet concernent les trois thèmes précédents :

2.1 - Méthodologie d'analyse de cas réels et élaboration de données objectives

Cette partie de l'étude s'appuie sur un travail de thèse effectué au LIRIGM et au CEMAGREF par Réjean Couture dans le cadre d'une collaboration avec l'Université Laval au Québec. Elle bénéficie de ce fait des apports de certains travaux antérieurs réalisés dans une phase initiale de cette thèse.

Le travail réalisé a porté principalement sur la mise au point d'une base d'observation objective des données phénoménologiques. Il repose sur l'étude, essentiellement géologique, d'un certain nombre de sites de grands éboulements rocheux réunissant des conditions favorables pour une analyse plus théorique et une modélisation ultérieures.

Il est apparu important de considérer dans cet examen les points principaux suivants :

- le contexte géologique (structural et lithologique) ayant conduit à l'occurrence de l'éroulement ;

- les caractéristiques principales du phénomène (origine, volume, distance parcourue, morphologie des dépôts) et dans la mesure du possible les conditions de l'éboulement (notamment si le mouvement s'est opéré en une seule fois, ou bien résulte d'une succession d'événements similaires de volume élémentaire plus faible) ;

- la blocométrie et la distribution des matériaux résultant de l'éboulement, et en particulier la relation avec les données géologiques et l'état de fracturation du massif (maille de fracturation naturelle, état d'altération et de décompression dans la zone de départ). L'évaluation du degré de comminution des blocs pendant leur parcours est généralement difficile, les dépôts étant rarement observables dans leur épaisseur. C'est cependant un élément important de l'interprétation de la dynamique du phénomène. On notera par exemple lors du grand éroulement de Val Pola en Valtellina (Italie, 1987) le broyage très important des matériaux dioritiques compacts et le volume considérable de matériaux fins produits par l'éboulement en raison du haut niveau d'énergie mis en jeu par le phénomène.

L'étude a été conduite principalement sur plusieurs sites alpins retenus en fonction de leurs caractéristiques bien adaptées aux objectifs poursuivis et de leur typologie diversifiée : Charmonetier près de Bourg-d'Oisans, Combe Noire au nord du Vercors près de Montaud, Le Claps de Luc dans le Diois, La Madeleine en Haute-Maurienne, Le Cornet d'Arèche en Tarentaise. Elle a été complétée par des observations effectuées sur des sites canadiens dans le cadre d'une collaboration avec l'Université Laval au Québec.

L'application à ces différents sites de la démarche d'étude précédente a permis de tester une méthodologie d'analyse dans des contextes variés, d'en évaluer les difficultés et les limites, notamment en ce qui concerne la caractérisation de la fragmentation et la répartition des matériaux dans la masse des dépôts et l'évaluation des conditions de l'éboulement. Parallèlement l'analyse de ces différents sites a permis de structurer des données objectives sur un ensemble de cas caractéristiques bien documentés.

2.2 - Etude des possibilités d'application aux éboulements rocheux des modèles développés dans le domaine des avalanches

Cette partie de l'étude a été conduite par l'équipe de Nivologie du CEMAGREF de Grenoble. Celle-ci développe depuis de nombreuses années des recherches et des outils de modélisation des avalanches de neige. Cette modélisation s'appuie sur les équations de conservation issues de la mécanique des fluides et sur des modèles rhéologiques qui traduisent la loi de comportement de la neige considérée comme un milieu continu.

Le domaine d'application des équations de Saint-Venant s'est étendu depuis quelques années à la modélisation des écoulements gravitaires rapides de fluides à rhéologie complexe. Dans le cas des avalanches rocheuses, il a été appliqué dans le cadre de l'étude une approche basée à la fois sur les équations de Saint-Venant et sur le modèle rhéologique de Mohr-Coulomb considérant l'avalanche

comme un fluide granulaire. Le système d'équation est résolu par un schéma numérique de type Godunov avec un maillage en éléments finis permettant de tenir compte de la géométrie du terrain.

L'étude a comporté un volet expérimental permettant une comparaison entre des données d'essais physiques et la modélisation numérique, en vue du calage de celle-ci. Différentes expériences d'avalanches de matériaux granulaires en canal incliné débouchant sur une zone de dépôt de pente nulle ont été réalisées pour différentes configurations des paramètres expérimentaux (nature et volume des matériaux, pente de l'écoulement). Pour chaque expérience des mesures ont été effectuées pour déterminer l'évolution de la hauteur en fonction du temps en trois points de la zone d'écoulement, les champs de vitesse à la surface de l'avalanche et la cartographie de la zone de dépôt.

Une modélisation numérique basée sur les équations de Saint-Venant et un modèle rhéologique de Mohr-Coulomb, a été appliquée aux expériences sur modèle physique en considérant comme données d'entrée l'angle de frottement mesuré et le volume des matériaux. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux montre un bon accord qui confirme la validité de ce type de modélisation.

Le même type de simulation numérique a été appliqué aux données de l'éboulement de Charmontier. Les résultats obtenus ont montré une bonne convergence d'ensemble avec les observations de terrain.

2.3 - Développement de modèles d'écoulement à caractéristiques variables

Cette partie du programme de recherche a fait l'objet d'un travail de thèse effectué au LMFA (UCB Lyon 1) et au CETE Lyon (thèse Isabelle Rochet Bouzid), thèse soutenue au mois de décembre 1999.

L'analyse des données d'observation tirées de cas réels d'éboulements rocheux en grande masse connus, conduit à formuler l'hypothèse d'un rôle majeur de la dilatanse dans la dynamique de ces phénomènes. C'est pourquoi, dans le cadre de ce projet de recherche il est apparu essentiel d'étudier des écoulements granulaires secs fortement dilatants. La démarche développée repose parallèlement sur une étude expérimentale d'écoulements granulaires dilatants en canal incliné et sur une approche de modélisation numérique exploitant l'hypothèse de l'écoulement d'un milieu continu, constitué d'un pseudo-fluide monophasique homogénéisé, doté de propriétés particulières et d'une loi d'état adaptée. Dans le cadre du programme, l'objectif principal de cette étude a consisté à explorer cette voie en vue d'en évaluer la faisabilité et les limites en relation avec la base expérimentale fournie par les essais physiques.

Le volet expérimental de cette recherche a consisté à analyser les variables caractéristiques cinématiques et thermodynamiques (position, vitesse, température granulaire) d'un écoulement granulaire fortement dilatant constitué de particules de forme irrégulière et de dimension homogène. Les expériences ont été conduites en canal incliné de pente variable et à débit stabilisé.

L'acquisition des données cinématiques de chaque particule dans l'écoulement a été effectuée par enregistrement photographique en surimpression et par double caméra vidéo. L'exploitation de ces données a permis d'avoir accès aux variables caractéristiques de l'écoulement granulaire et d'analyser la distribution de la compacité, de la vitesse et de la température granulaire au sein de la veine et notamment leur variation en fonction de la hauteur dans celle-ci.

Sur la base des résultats expérimentaux une hypothèse a pu être formulée sur la forme possible d'une loi d'état attachée au pseudo-fluide représentatif de l'écoulement granulaire dans une approche homogénéisée. La loi d'état proposée traduit une décroissance de type hyperbolique de la compacité en fonction de l'augmentation de la hauteur dans l'écoulement et de la température granulaire.

Le volet numérique de cette recherche a consisté à prendre en compte cette loi d'état dans un modèle d'écoulement de type Navier-Stokes appliqué à l'écoulement gravitaire d'un fluide granulaire homogénéisé compressible monophasique, de masse volumique largement variable et bornée par la masse volumique de l'air et celle du rocher foisonné. L'intérêt majeur et original de cette approche est de prendre en compte de manière totalement intégrée dans une modélisation globale, l'écoulement de la partie dense de l'avalanche rocheuse et les écoulements induits dilués qui l'accompagnent ou la précèdent (zones diluées, dégagements de poussières, effet de souffle) actuellement largement méconnus.

Les simulations numériques ont été conduites au moyen du code de calcul FIDAP qui a été adapté pour permettre de prendre en compte la forme de loi d'état déterminée à partir des résultats de l'étude expérimentale. Les résultats obtenus au prix de quelques difficultés numériques liées aux limites d'adaptation du code, ont permis de confirmer la faisabilité de la démarche et de valider le concept de modélisation considéré. En particulier ils mettent bien en évidence la propagation des différentes zones de densité variable formant et accompagnant l'avalanche rocheuse, notamment les effets induits (souffle, poussières) et confirment l'intérêt de cette approche. Toutefois pour aller plus loin il sera nécessaire de développer un code de calcul spécifique mieux adapté aux contraintes imposées par ce type de modélisation et aux conditions de l'expérimentation numérique.

3 - CONCLUSION

D'une manière générale, les résultats obtenus suivant les trois axes principaux de recherche de ce projet montrent qu'une contribution tout à fait positive a pu être apportée dans le domaine de la caractérisation et de la modélisation des grands éboulements rocheux. Toutefois si ces résultats sont encourageants, un effort de recherche et de développement important reste encore à faire pour progresser plus avant dans la connaissance de la physique de ces phénomènes complexes et pour aboutir à la mise au point d'outils spécifiques véritablement adaptés aux applications.

Sur le plan scientifique, les recherches sur l'étude et la modélisation des écoulements granulaires seront amenées à être poursuivies dans le cadre de différentes actions de recherche. Il serait souhaitable qu'il en soit de même pour leur application à l'étude des avalanches rocheuses.

Sur le plan opérationnel, les résultats principaux obtenus dans le cadre de ce projet doivent trouver une valorisation à travers une amélioration des méthodes actuelles, notamment dans le domaine de la modélisation. En raison de l'intérêt des résultats actuels, l'adaptation et (ou) le développement des outils correspondants justifient la poursuite d'un effort dans ce sens.

Lyon, le 2 Avril 2000

L.ROCHET