

DISS. ETH NO. 20543

**MEASUREMENTS OF VELOCITY,
VELOCITY FLUCTUATIONS AND
DENSITY IN DRY GRANULAR FLOWS:
SIGNIFICANCE FOR THE
CONSTITUTIVE MODELING IN THE
FRICTIONAL-COLLISIONAL REGIME**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

LOUIS BUGNION

MSc in Physics, EPFL

(Federal Institute of Technology Lausanne)

born on 30 August 1983

citizen of Belmont-sur-Lausanne, Vaud

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. W. Kirchner

Prof. Dr. R. I. Leine

Dr. P. Bartelt

2012

Summary

A common feature of snow avalanches, rockslides and debris flows is that they are made of a large number of grains moving as a continuum. The grains are simultaneously accelerated by gravity and slowed down by the multiple contacts that they experience with each other or with the bed surface. Both processes result in variations of density, velocity and internal stresses within the flow. The rheology of granular flows, i.e. the dependency of the internal stresses on the relative motion of the individual grains, is poorly understood, in particular for flows with multiparticle, enduring contacts (frictional-collisional regime). The subject of this thesis is the formulation of mathematical relations for granular flows which reproduce the experimentally observed flow variables.

Laboratory chute experiments with finite volumes of glass beads in a dam break set-up are performed. The unsteady flows are filmed through a transparent sidewall with a high-speed camera at a fixed location of the chute. Pattern matching and particle tracking methods are developed to extract density, velocity and velocity fluctuations from the recordings. Thanks to the accuracy of the data, time derivatives and spatial gradients of the flow variables can be computed, allowing the calculation of the internal stresses from the mass and momentum conservation equations for two-dimensional, shallow flows. Constitutive laws needed to close the system of governing equations are derived by examination of the data over a continuous region of the flow variable space which identifies with the frictional-collisional regime.

A first constitutive law relates density to shear rate (dilatancy) and normal stress (compaction), and includes a rate-dependent limit density at low normal stress. A second constitutive law quantifies the shear stress as an increasing function of the shear rate, the normal stress and the velocity fluctuations. Velocity fluctuations are found to be isotropic and in the same order of magnitude as the vertical component of the mean velocity, leading to a simplified form of the energy conservation equation. The results argue

in favor of dry granular flow models accounting for non-constant density and non-zero velocity fluctuations also in the frictional-collisional regime. The new constitutive laws may find application in the study of more complex granular flows, such as two-phase flows, which exhibit non-constant solid volume fraction.

Résumé

Les avalanches, les glissements de terrain et les laves torrentielles ont ceci en commun qu'ils sont constitués d'un grand nombre de grains se mouvant de façon cohérente. Les grains sont accélérés par la force de gravité en même temps qu'ils sont freinés par les multiples contacts qu'ils subissent entre eux ou avec le milieu environnant. Les deux effets ont pour conséquence des variations de densité, de vitesse et de l'état des contraintes internes de l'écoulement. La rhéologie des écoulements granulaires, c'est-à-dire la dépendance de l'état des contraintes internes vis-à-vis du mouvement relatif des grains, est mal comprise, en particulier pour des écoulements qui se caractérisent par des contacts prolongés et/ou impliquant plusieurs grains (régime frictionnel-collisionnel). Le sujet de cette thèse est la formulation de relations mathématiques qui sont à même de reproduire les variables d'écoulement observées expérimentalement pour des écoulements granulaires secs.

Des expériences sur un plan incliné dans une configuration de rupture de barrage ont été réalisées en laboratoire avec des volumes finis de billes de verre. Les écoulements non-stationnaires sont filmés à travers une paroi transparente à l'aide d'une caméra ultra rapide fixée le long du plan incliné. Des méthodes de reconnaissance de motifs et de suivi des particules ont été développées pour extraire des valeurs de densité, de vitesse et de fluctuation de la vitesse à partir des enregistrements. Grâce à la précision des données récoltées, les dérivées temporelles et les gradients dans l'espace des variables d'écoulement peuvent être calculés, permettant ainsi de déterminer l'état des contraintes internes à partir des équations de conservation de la masse et de l'impulsion pour des écoulements bidimensionnels et peu profonds. Les lois constitutives nécessaires à la fermeture du système d'équations sont dérivées en examinant les données sur une région continue de l'espace des variables d'écoulement qui correspond au régime frictionnel-collisionnel.

Une première loi constitutive établit une relation entre la densité et le taux

de cisaillement (dilatance) d'une part, et entre la densité et la contrainte normale (compaction) d'autre part. De plus, elle introduit une densité limite à faible contrainte normale qui dépend du taux de cisaillement. Une deuxième loi constitutive définit la contrainte de cisaillement en tant que fonction croissante du taux de cisaillement, de la contrainte normale et de la fluctuation de la vitesse. Il ressort que la fluctuation de la vitesse est isotrope et, du même ordre de grandeur que la composante verticale de la vitesse, ce qui se traduit par une forme simplifiée de l'équation de conservation de l'énergie. Ces résultats plaident en faveur de modèles prenant en compte une densité non-constante et une fluctuation de la vitesse non-nulle pour les écoulements granulaires dans le régime frictionnel-collisionnel. Les nouvelles lois constitutives peuvent trouver des applications dans l'étude d'écoulements granulaires plus complexes, tels que des écoulements biphasiques présentant des fractions volumiques non-constantes.