

Abstract

This PhD dissertation is dedicated to the identification of the micromechanical origins of non-affine kinematics (displacement fluctuations) in non-cohesive frictional granular materials. Constituent particles translations deviate from the displacements predictions by the equivalent continuum due to the prevalent steric volume exclusion. This deviation, called "displacement fluctuations", is one of the origins of the irreversibility in the mechanical behaviour of granular materials. To establish quantitative relationships between the fluctuations and various particle-related quantities, statistical analyses of the fluctuations are conducted, considering one, two, or even three components of the latter; fluctuations are measured from experimental shear tests on 2D granular materials (using a digital image correlation technique for kinematic field measurements) and from discrete element simulations of samples composed of disks or spheres.

The analysis of the displacement fluctuations of particles in a sample subjected to an external load reveals two modes: the unstructured fluctuations (relatively isolated events) and the structured fluctuations (in the form of pseudo-circular structures-vortices). The unstructured fluctuations are identified as corresponding to particles that are out of equilibrium and seeking new equilibrium positions. In contrast, structured fluctuations, which account for the majority of fluctuations, are associated with particles that remain in equilibrium during the sample deformation process.

Fluctuations are studied using statistical methods by analysing their components (two in the case of two-dimensional systems, three in the case of three-dimensional systems), which follow q-Gaussian power laws, typical of physical phenomena with long-range or short-range correlations depending on the chosen macroscopic strain increment. In addition to traditional statistical analyses of a single component (based on varying angular projections), we propose multidimensional statistical analyses in which all components of the fluctuations are taken into account and associated with a state variable specific to the particles (particle size, coordination number, local stress tensor, local fabric tensor). Thus, this research shows that displacement fluctuations (and their directions) are primarily governed by the spatial organisation of contacts around the particles and associated with the fabric tensor, whose significance makes it a good candidate for predicting structured fluctuations of the individual particles.

Keywords: Physical experiments, Numerical experiments, Granular material, Displacement fluctuations, Multi-dimensional statistics.

Résumé

Cette thèse de doctorat est consacrée à l'identification des origines micromécaniques de la cinématique non affine (fluctuations de déplacement) des milieux granulaires frottants non cohésifs. Soumises à des chargements extérieurs, les particules s'écartent de la cinématique prédite par la mécanique des milieux continus en raison des contraintes géométriques au sein des assemblages granulaires. Cet écart, appelé "fluctuations de déplacement", est l'une des origines de l'irréversibilité du comportement mécanique des milieux granulaires. Afin d'établir des relations quantitatives entre les fluctuations et différentes quantités liées aux particules, des analyses statistiques des fluctuations sont effectuées en prenant en compte une, deux, voire trois composantes de ces dernières ; fluctuations mesurées à partir d'essais expérimentaux de cisaillement de milieux granulaires 2D (à l'aide d'une technique de mesure de champs cinématiques par corrélation d'images numériques) et à partir de simulations par éléments discrets d'échantillons de disques ou de sphères.

L'étude des fluctuations de déplacement des particules d'un échantillon soumis à un chargement extérieur met en évidence deux modes : les fluctuations non structurées (événements relativement isolés) et structurées (sous forme de structures pseudo-circulaires – vortex). Les fluctuations non structurées sont identifiées comme correspondant à des particules hors équilibres cherchant de nouvelles positions d'équilibre. À l'opposé, les fluctuations structurées, qui forment l'essentiel des fluctuations, sont associées à des particules qui restent en équilibre durant le processus de déformation de l'échantillon.

Les fluctuations sont étudiées via l'outil statistique, par l'analyse de leurs composantes (deux dans le cas des milieux bidimensionnels, trois dans le cas tridimensionnel) qui mettent en évidence des lois puissances du type q -Gaussienne, typique de phénomènes physiques avec corrélations à distance plus ou moins grande en fonction de l'incrément de déformation macroscopique choisi. En plus des analyses statistiques classiques d'une seule composante (suivant des projections angulaires variables), on propose dans le cadre de cette étude des analyses statistiques multidimensionnelles pour lesquelles toutes les composantes des fluctuations sont prises en compte et associées à une variable d'état spécifique aux particules (taille de la particule, nombre de coordinations, tenseur des contraintes, tenseur de texture). Ainsi, ce travail de recherche montre que les fluctuations de déplacement (et leurs directions) sont principalement guidées par l'organisation spatiale des contacts autour des particules et associées au tenseur de texture dont l'importance en ferait un bon candidat pour prédire les fluctuations structurées des particules.

Mots-clés : Expériences physiques, Expériences numériques, Matériau granulaire, Fluctuations de déplacement, Statistiques multidimensionnelles.