

Master internship

Strain Localization in Granular Materials: Experimental Investigation Using Triaxial Testing and X-Ray Microtomography

Context: Granular materials subjected to shear often undergo a transition from homogeneous deformation to localized deformation, leading to the formation of *shear bands*—narrow zones of intense strain that control material failure (Fig.1). Classical continuum models such as the Mohr–Coulomb and the Drucker–Prager failure criterion assume material homogeneity. However, this assumption breaks down once strain localization emerges, as particle rearrangements and fabric evolution introduce strong internal heterogeneities. Although enriched and two-scale models attempt to describe behavior inside and outside shear bands separately, the grain-scale mechanisms driving localization—particularly during triaxial compression and near the critical state—remain insufficiently understood. A better understanding of these processes is essential for improving constitutive models in geomechanics and for predicting geophysical hazards such as landslides and earthquakes.



Fig.1: A shear band observed in a classical triaxial compression test (left); deviatoric strain field at different axial strain stages: $\varepsilon_a = 3\%$ (middle) and $\varepsilon_a = 12\%$ (right).

Objectives: The primary objective of this project is to experimentally investigate how controlled grain-scale heterogeneities influence the onset and evolution of strain localization in granular materials subjected to triaxial compression. Mechanical tests will be conducted using a newly developed triaxial cell (Fig.2) designed within the CNRS Ingénierie INSTAGRATOM project in order to characterize the macroscopic response of granular assemblies under well-controlled loading conditions. Selected samples will then be analyzed using X-ray microtomography (XRCT) at the microtomography platform of Laboratoire Navier and complemented by additional measurements at the BM18 beamline of the European Synchrotron Radiation Facility, providing three-dimensional insight into the evolution of internal structure during deformation. To systematically investigate the role of heterogeneity, samples will be prepared with different mean particle sizes, and larger inclusions—5 to 10 times the base grain diameter—will be randomly introduced at controlled volumetric fractions (5%, 10%, 20%, and 30%), with both stiffness-matched and stiffness-contrasted configurations. These inclusions are expected to act as perturbation sources that may trigger early micro-shear band formation. By combining mechanical measurements with microstructural characterization, the project seeks to establish quantitative relationships between grain-scale descriptors—such as fabric evolution, contact network organization, and porosity distribution—and the macroscopic stress–strain response. The experimental findings will be compared with ongoing discrete numerical simulations (DEM), thereby fostering strong experimental–numerical synergy and contributing to improved predictive modeling of strain localization in granular media.

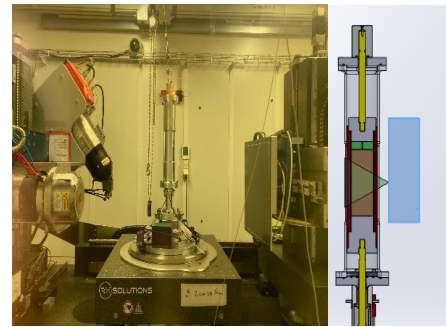


Fig.2 : Assembled setup with sensors, 10kN actuator and the triaxial cell ready to be used in X-ray facility (left); Schematic view of the designed triaxial cell (right).

- **Candidate profile:** The internship is intended for Master's students or final-year engineering students in mechanical engineering, civil engineering, physics, or materials science. Applicants should demonstrate a strong interest in experimental mechanics and granular materials. Experience in image processing or microstructural analysis would be advantageous but is not required. The project will particularly suit candidates motivated by multi-scale approaches and interested in gaining a deeper understanding of geophysical failure mechanisms.
- **Duration:** 4 to 6 months, with a flexible starting date between March and May 2026.
- **Location:** Laboratoire Navier, Champs-sur-Marne, Paris, France—30 minutes by train (RER A) from the city center.
- **Salary:** Approximately €550 per month, in accordance with standard French internship regulations.
- **Research team:** The internship will be carried out at Laboratoire Navier under the supervision of Patrick Aïmedieu (Research Engineer), Michel Bornert (Researcher), and Kianoosh Taghizadeh (Researcher and coordinator of the CNRS Ingénierie INSTAGRATOM project).

How to apply? Interested candidates are invited to contact Kianoosh Taghizadeh (kianoosh.taghizadeh@enpc.fr) or Michel Bornert (michel.bornert@enpc.fr).

Master internship

Localisation des déformations dans les milieux granulaires : étude expérimentale par essais triaxiaux et microtomographie aux rayons X

Contexte: Les matériaux granulaires soumis au cisaillement subissent fréquemment une transition d'un régime de déformation homogène vers une déformation localisée, conduisant à la formation de bandes de cisaillement — zones étroites de forte déformation qui contrôlent la rupture du matériau (Fig. 1). Les modèles classiques de milieux continus, tels que les critères de rupture de Mohr–Coulomb et de Drucker–Prager, reposent sur l'hypothèse d'homogénéité du matériau. Toutefois, cette hypothèse devient invalide dès lors que la localisation des déformations apparaît, les réarrangements de grains et l'évolution de la texture introduisant de fortes hétérogénéités internes. Bien que des modèles enrichis ou bi-échelles tentent de décrire séparément le comportement à l'intérieur et à l'extérieur des bandes de cisaillement, les mécanismes à l'échelle du grain à l'origine de la localisation — en particulier lors d'une compression triaxiale et à proximité de l'état critique — restent encore insuffisamment compris. Une meilleure compréhension de ces processus est essentielle pour améliorer les lois de comportement en géomécanique et pour mieux prédire les aléas géophysiques tels que les glissements de terrain et les séismes.



Fig.1 : Une bande de cisaillement observée dans un essai de compression triaxiale classique (à gauche) ; champ de déformation déviatorique à différents stades de déformation axiale : $\epsilon_a = 3\%$ (au milieu) et $\epsilon_a = 12\%$ (à droite).

Objectifs: L'objectif principal de ce projet est d'étudier expérimentalement l'influence d'hétérogénéités contrôlées à l'échelle du grain sur l'initiation et l'évolution de la localisation des déformations dans des milieux granulaires soumis à une compression triaxiale. Des essais mécaniques seront réalisés à l'aide d'une cellule triaxiale récemment développée (Fig. 2) dans le cadre du projet CNRS Ingénierie INSTAGRATOM, afin de caractériser la réponse macroscopique d'assemblages granulaires sous des conditions de chargement parfaitement contrôlées. Des échantillons sélectionnés seront ensuite analysés par microtomographie aux rayons X (XRCT) sur la plateforme de microtomographie du Laboratoire Navier, et complétés par des mesures supplémentaires sur la ligne BM18 de l'ESRF, offrant ainsi une vision tridimensionnelle de l'évolution de la structure interne au cours de la déformation. Afin d'étudier de manière systématique le rôle de l'hétérogénéité, des échantillons seront préparés avec différentes tailles moyennes de particules, et des inclusions de plus grande taille — comprises entre 5 et 10 fois le diamètre moyen des grains de base — seront introduites aléatoirement à des fractions volumiques contrôlées (5 %, 10 %, 20 % et 30 %), avec des configurations à rigidité identique ou contrastée. Ces inclusions devraient agir comme des sources de perturbation susceptibles de déclencher précocement la formation de micro-bandes de cisaillement. En combinant mesures mécaniques et caractérisation microstructurale, le projet vise à établir des relations quantitatives entre des descripteurs à l'échelle du grain — tels que l'évolution de la texture, l'organisation du réseau de contacts et la distribution de la porosité — et la réponse macroscopique contrainte-déformation. Les résultats expérimentaux seront comparés à des simulations numériques discrètes (DEM) en cours, favorisant ainsi une forte synergie expérimental-numérique et contribuant à l'amélioration des modèles prédictifs de la localisation des déformations dans les milieux granulaires.

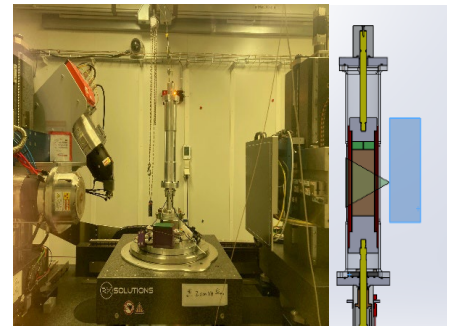


Fig. 2 : Configuration assemblée avec capteurs, actionneur de 10 kN et cellule triaxiale prête à être utilisée dans l'installation de rayons X (à gauche) ; Vue schématique de la cellule triaxiale conçue (à droite).

- **Profil recherché:** Ce stage s'adresse aux étudiants en Master ou aux élèves ingénieurs en dernière année dans les domaines du génie mécanique, du génie civil, de la physique ou des sciences des matériaux. Les candidats doivent manifester un intérêt marqué pour la mécanique expérimentale et les milieux granulaires. Une expérience en traitement d'images ou en analyse microstructurale serait appréciée, sans être indispensable. Le projet conviendra particulièrement aux candidats motivés par les approches multi-échelles et souhaitant approfondir leur compréhension des mécanismes de rupture géophysique.
- **Durée:** 4 à 6 mois, avec un début flexible entre mars et mai 2026.
- **Lieu:** Laboratoire Navier, Champs-sur-Marne, France (environ 30 minutes du centre de Paris via le RER A).
- **Gratification:** Environ 550 € par mois, conformément à la réglementation française en vigueur pour les stages.
- **Encadrement:** Le stage se déroulera au Laboratoire Navier sous la supervision de Patrick Aumedieu (Ingénieur de recherche), Michel Bornert (Chercheur) et Kianoosh Taghizadeh (Chercheur et coordinateur du projet CNRS Ingénierie INSTAGRATOM).

Candidature? Les candidats intéressés sont invités à contacter Kianoosh Taghizadeh (kianoosh.taghizadeh@enpc.fr) ou Michel Bornert (michel.bornert@enpc.fr).