

Un rêve devenu réalité : explorer une bande de cisaillement à l'échelle des grains

Grain-scale experimental investigation of shear banding in sand

Andò E., Desrues J., Bésuelle P., Viggiani G.
UJF/Grenoble INP/CNRS, Laboratoire 3SR, Grenoble, France

Hall S.
Division of Solid Mechanics, Lund University, Lund, Sweden and European Spallation Source AB, Lund, Sweden

RÉSUMÉ : La caractérisation expérimentale du comportement des milieux granulaires repose depuis la fondation de la mécanique des sols sur des expériences de laboratoire réalisées sur des échantillons suffisamment grands vis-à-vis des grains, pour être considérés comme représentatifs du comportement moyen du matériau. Le développement des modèles aux éléments discrets (DEM) a permis de simuler numériquement le comportement d'assemblées de particules. Mais à l'exception de quelques études pionnières, il manquait jusqu'à récemment à la micro-mécanique des milieux granulaires numérique son pendant expérimental. Grâce aux progrès récents de la micro-tomographie à rayons X, il est aujourd'hui possible, avec un synchrotron comme l'ESRF mais aussi avec un tomographe de laboratoire tel que celui installé au laboratoire 3SR, de réaliser, sous tomographie, des expériences de mécanique des sols tels que des essais triaxiaux sur sable, avec une résolution spatiale permettant de suivre très précisément le mouvement de chacun des grains de l'échantillon. L'apparition de bandes de cisaillement et les mécanismes intimes qui y conduisent peuvent ainsi être explorés expérimentalement, et confrontés aux résultats de la modélisation numérique.

ABSTRACT: Strain localization presents major challenges for continuum models for geomaterials. For such models to be successful, the microstructure of the material (for sand, the grain structure) should be explicitly taken into account, in one way or another, which in turn requires experimental characterization of shear banding at the grain scale. In this paper, x-ray tomography is used to image samples of two different sands while they deform under triaxial compression. The kinematics (displacement + rotation) of each individual grain in the sample is measured with different techniques, combining recent developments in image correlation and particle tracking. A few selected results are presented, which allow a number of interesting observations to be made on shear bands when they are fully developed as well as at the transition from homogeneous to localized deformation.

KEYWORDS: Micro-Mechanics, Sand, Grains, Micro Tomography, CT-Scan, Image Analysis, Strain localization, triaxial test

1 INTRODUCTION

La localisation de la déformation, qui est associée généralement à la rupture, se joue à une échelle proche de celle des grains. La modélisation tend actuellement à introduire des éléments de micro-structure pour mieux modéliser la localisation. Il en découle un besoin de données expérimentales à cette échelle.

Pour les milieux granulaires, la micro-échelle naturelle est celle des grains. Des études ont été faites sur les mécanismes de déclenchement de la localisation à cette échelle (e.g., Mühlhaus and Vardoulakis 1987, Iwashita and Oda 2000). Historiquement, le comportement du sable à cette échelle a été exploré plutôt numériquement (par exemple par la méthode des éléments discrets) qu'expérimentalement.

Les techniques expérimentales en Géomécanique ont évolué considérablement ces dernières années (voir une revue de synthèse par Viggiani and Hall (2008) pour plus de références). La tomographie à rayons X permet aujourd'hui de suivre expérimentalement l'évolution de la microstructure complète en 3D lors d'un essai triaxial sur un petit échantillon de sable (échantillon de 60.000 grains qui reste néanmoins représentatif). On distingue parfaitement chacun des grains, avec une résolution telle que l'on peut les suivre individuellement dans leur mouvement au cœur de l'échantillon. Pour cela on utilise la Corrélation d'Image Numérique (Hall et al. 2010) ou le suivi de particules (Andò et al. 2012a), ou plus récemment, une combinaison des deux (Andò et al. 2012b).

On présente ici une sélection de résultats obtenus sur deux sables différents, l'un anguleux (sable d'Hostun) et l'autre

arrondi (Caicos ooids), en utilisant le tomographe à rayons X du laboratoire 3SR de Grenoble. On s'intéresse à la naissance et à l'évolution d'une bande de cisaillement dans un échantillon soumis à un essai triaxial sous tomographie. L'analyse est faite sur l'ensemble de l'échantillon, et aussi sur un cube contenant un millier de grains, pris à proximité de la bande de cisaillement. Dans les deux cas on s'intéresse à la cinématique fine de cet assemblage de grains, chacun étant caractérisé par son déplacement et sa rotation en 3D.

2 METHODES

2.1 Dispositifs expérimentaux et matériaux d'essai

Les essais décrits ici sont des essais triaxiaux classiques en compression, à ceci près que les échantillons sont très petits : diamètre 11 mm, hauteur 24 mm. Le système triaxial a été mis en œuvre précédemment sur une ligne de lumière synchrotron de l'ESRF, il est décrit en détail dans la référence Hall et al. (2010). Tout comme l'échantillon, le système est de type classique et se distingue surtout par sa taille réduite ; on notera cependant que la cellule est réalisée en PMMA, et que pour éviter d'interférer avec le faisceau lors de la rotation du montage devant celui-ci (un tour complet pour réaliser un millier de radiographies), on a supprimé les tirants habituels ; de ce fait c'est le corps de la cellule qui reprend en traction l'effort de compression sur l'échantillon. L'effort est appliqué par un vérin mécanique contrôlé par un moteur.

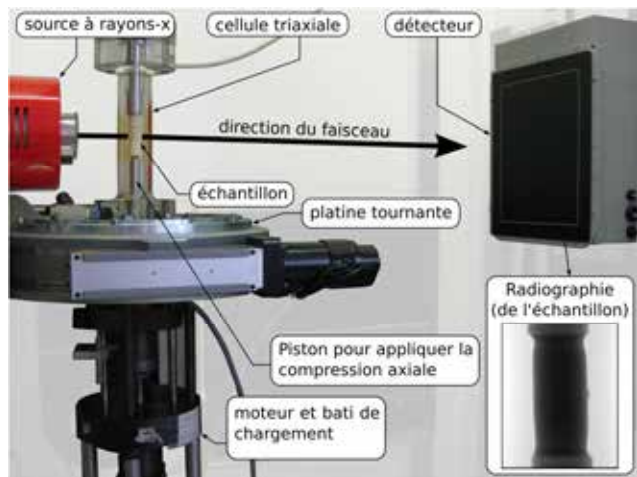


Figure 1. Installation d'essai triaxial sur sable "in situ" c'est à dire sous faisceau dans le tomographe à Rayons X du laboratoire 3SR.

La figure 1 présente à gauche la source à rayons X, l'échantillon dans la cellule fixée sur le plateau tournant, et à droite l'imageur qui permet d'enregistrer les radiographies du montage pour chaque nouvelle incidence (e.g. vignette en bas à droite). Le dispositif de chargement est placé sous le plateau tournant, il applique un déplacement vers le haut de la tête inférieure alors que la tête supérieure est fixe.

L'étude présentée porte sur deux sables (voir Fig. 2), l'un est le sable d'Hostun HN31, anguleux, quartzique, avec un D_{50} de 338 μm , et l'autre le Caicos ooids (sable d'ooïdes), un sable naturel provenant de British West Indies, constitué de grains de calcite arrondis, avec un D_{50} de 420 μm . Les échantillons sont déposés par pluviométrie dans un moule garni d'une membrane en latex fine, ce qui produit un état initial dense. Les échantillons sont testés en état sec, sous pression de cellule constante, avec une vitesse de raccourcissement axial de 21 $\mu\text{m}/\text{min}$. L'essai est interrompu à différentes étapes, pour permettre la réalisation d'une tomographie qui prend environ deux heures. La résolution des images 3D volumiques obtenues est de 15,6 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ (pixel en 3D, cubique).

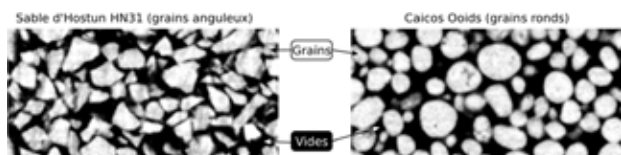


Figure 2. Deux coupes 2D dans les volumes 3D tomographiques des échantillons de sable Hostun HN31 et Caicos Ooids

2.2 Mesure de la cinématique à l'échelle des grains

Pour étudier la déformation à l'échelle des grains, il faut réussir à identifier chaque grain dans les images 3D qui résultent de la tomographie. Il faut donc binariser les images, c'est-à-dire décider pour chaque voxel, en comparant son niveau de gris à un certain seuil, s'il fait partie des grains ou de l'espace poral. Il faut ensuite séparer l'espace identifié comme celui des grains, en grains individuels : c'est la segmentation, qui utilise un algorithme dit de « partage des eaux » (*watershed*). Une fois séparés, on identifie chaque grain dans l'image i par un label qui lui est propre. Enfin on procède au suivi de grain entre deux images 3D, en recherchant l'homologue de chaque grain de l'image i dans l'image $i+1$ dans un certain voisinage spatial. L'élue est le grain dont la « carte d'identité géométrique » est la plus proche. La caractéristique géométrique considérée est le volume. Ce processus est très rapide, car il repose non pas sur une corrélation mais sur une simple recherche dans une liste de grains. La méthode a été baptisée « ID-Track ». Le déplacement est défini comme le changement de position du centre de masse du grain d'une configuration à l'autre. L'erreur de mesure est

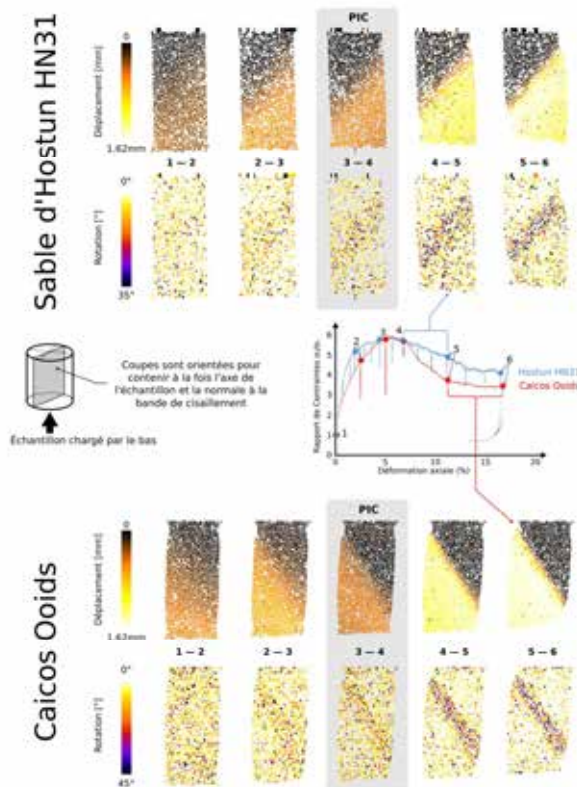


Figure 3. Résultats de ID-Track pour cinq incréments de compression triaxiale sur sable d'Hostun et sur Caicos Ooids. Ligne supérieure : déplacement ; ligne inférieure : rotation. Les incréments 1-2, 2-3,... réfèrent aux états indiqués 1, 2, 3,... sur les courbes contrainte-déformation présentées en vignette.

estimée à moins de 1.5 μm dans les conditions considérées ici (voir Andò et al. 2012a).

En ce qui concerne la rotation 3D des grains, dans une première approche nous l'avons mesurée en déterminant le changement d'orientation de directions caractéristiques du grain, en substance les valeurs propres majeure et mineure du tenseur de moment d'inertie du volume occupé par le grain. Cette approche permet des calculs très rapides, car elle repose sur la comparaison assez simple des orientations de deux vecteurs 3D. En revanche, l'expérience a montré que cette approche conduit à un taux excessif de mesures aberrantes, qu'on attribue soit à une définition trop fragile des vecteurs propres du tenseur (lorsque celui-ci est trop proche de l'isotropie, c'est-à-dire le grain trop sphérique, ou de l'isotropie transverse, grain à section circulaire), soit à des sauts de 180 degrés, qu'on peut certes traiter mais non sans complications.

Une nouvelle approche hybride a été définie (Andò et al. 2012b), sur une base de corrélation d'image numérique à l'échelle du grain, associée à une poursuite de grain suivant la méthode précédemment mentionnée. La méthode de corrélation à l'échelle du grain, dans le même esprit que Hall et al. 2010, exploite au mieux la richesse de l'information concernant le grain (il contient typiquement plusieurs milliers de voxels) plutôt que de la résumer à trois vecteurs d'orientation. En revanche, elle est plus coûteuse en temps de calcul. L'approche hybride coupe court à la recherche coûteuse des grains homologues par corrélation d'image, en utilisant la méthode ID-Track pour établir les correspondances entre grains. Pour la méthode de corrélation d'image particulière, un grain définit dans chacune des deux images une zone d'intérêt. On va appliquer une transformation, de type translation et rotation, à la zone d'intérêt de l'image de référence, pour que cette zone d'intérêt vienne s'identifier au mieux à son homologue dans la seconde image. La transformation géométrique est basée sur une interpolation trilineaire, et la recherche de la meilleure

ressemblance est menée selon un algorithme d'optimisation du type BFGS. On obtient ainsi 3 composantes de déplacement et trois de rotation pour le grain considéré, cette procédure est répétée pour tous les grains de l'échantillon. En termes de temps de calcul, sur un Intel Core i7, la corrélation prend environ 10 secondes par grain, le temps de produire en moyenne 200 images déplacées et tournées avant de trouver un minimum.

3 QUELQUES RÉSULTATS

La Figure 3 montre les résultats de l'application de la méthode de poursuite de grains ID-Track aux cinq premiers incréments de deux essais triaxiaux menés sur les deux sables précités. Les images présentent des coupes axiales dans le volume de grains dans l'état de référence. L'orientation des coupes a été choisie telle qu'elles contiennent à la fois l'axe de l'échantillon, et la normale à la bande qui se forme lors de l'essai. Pour chaque incrément, chaque grain suivi a été coloré, dans cette illustration, soit en fonction de son déplacement (module du vecteur déplacement), soit de la valeur de sa rotation (l'axe de rotation n'est pas représenté). Les grains qu'on n'a pas réussi à suivre sont laissés en blanc. On rappelle que le déplacement est nul en tête d'échantillon, en raison du chargement par le bas.

Le comportement global est clair : le premier incrément est diffus, une légère déviation de la verticalité de l'échantillon vierge produit une légère inclinaison du champ de déplacement. En mécanique des milieux continus, ceci se traduirait par un champ de déformation pas tout à fait uniforme, mais sans gradients forts. Dès l'incrément 2-3, le champ montre un gradient plus marqué dans la direction de la future bande de cisaillement, qui devient évidente à l'incrément 4-5.

En ce qui concerne les rotations, le pic (état 3) marque une transition entre l'absence d'organisation spatiale claire, et une concentration dans la zone de déformation localisée. On note toutefois que la zone de concentration de rotation paraît plus large que la bande de cisaillement vue sur les cartes de déplacement ; on relève une largeur de 10 à 12 grains dans la zone de rotations fortes dans le sable d'Hostun, moins (7 à 8) dans Caicos ooids (voir Figure 4). La bande est aussi plus inclinée dans ce dernier cas. On peut penser que la différence de forme de grains est responsable de cette différence de largeur de bande de forte rotation, en raison de la plus grande distance de transmission de la rotation d'un grain dans un arrangement fortement imbriqué comme le sont naturellement les grains de forme irrégulière et allongée, que dans un arrangement de grains ronds qui peuvent tourner individuellement en glissant par rapport aux voisins. Ceci peut aussi expliquer la plus grande résistance résiduelle du sable anguleux.

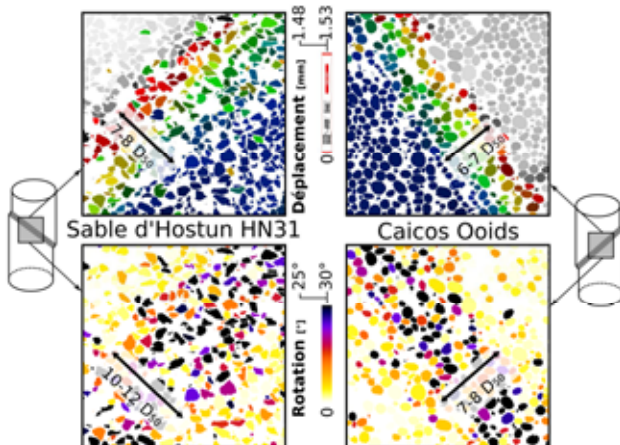


Figure 4. Zoom sur la bande de cisaillement, incrément 5-6

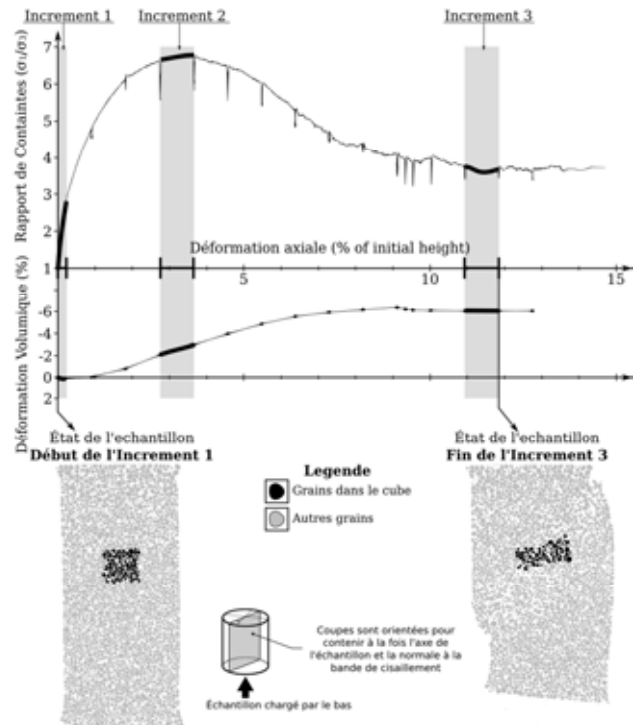


Figure 5. Haut : courbes contrainte-déformation, sable Caicos Ooids. Bas : coupes axiales des volumes tomographiques au début et à la fin du test, montrant l'emplacement des grains analysés figure 6.

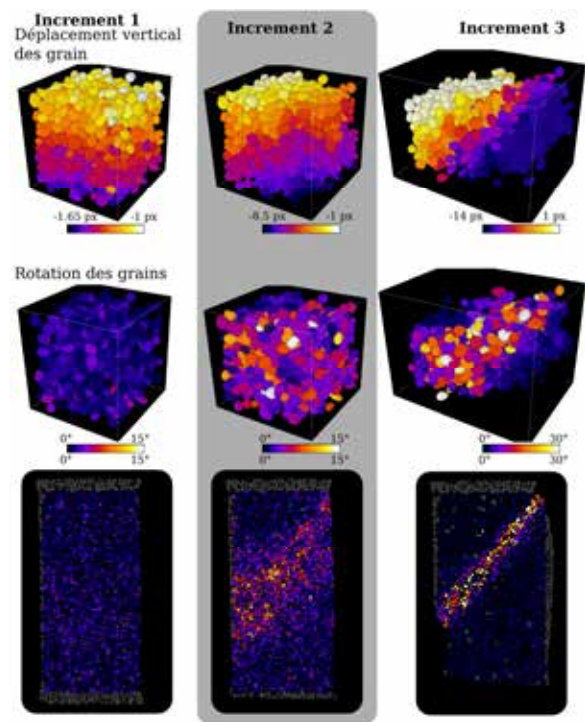


Figure 6. Haut et milieu: déplacement vertical et rotation des grains du petit volume 3D extrait comme indiqué en figure 5. Les valeurs négatives de déplacement signifient 'vers le haut'. ligne du bas : rotations des grains sur une coupe globale de l'échantillon

On présente Figure 5 la courbe contrainte-déformation pour un autre essai sur Caicos ooids. La variation de volume est essentiellement et nettement dilatante, après une brève phase de légère contraction. Les phases de relaxation observables sur la courbe de contrainte correspondent aux étapes de scan, durant lesquelles l'écrasement axial est stoppé pendant environ une heure ; elles sont au nombre de 16. Les incréments analysés ci-après sont signalés sur la courbe : un incrément en tout début d'essai, l'incrément juste avant le pic de résistance, et un incrément en palier, alors que la variation de volume globale a complètement cessé. En bas de la figure 5, on montre un sous-volume de grains sélectionnés dans la configuration initiale, et ce que deviennent ces grains en phase finale.

La Figure 6 (haut et milieu) montre l'évolution du sous-volume au cours des trois incréments choisis. Un millier de grains constituent ce volume, dont on représente la position en début d'incrément avec le déplacement vertical au cours de l'incrément codé en couleur (ligne du haut), et la rotation de même (ligne du milieu). Les déplacements sont négatifs parce que dirigés vers le haut, puisque l'écrasement de l'échantillon est appliqué par le bas. Un déplacement de 1 pixel vaut 15,6 μm . Dans le premier incrément, les déplacements correspondent à une déformation diffuse, et les rotations sont insignifiantes et non organisées spatialement. Dans l'incrément 2, les déplacements restent diffus mais leur gradient n'est plus vertical, ce qui indique une rotation globale ; c'est le résultat d'une bande de cisaillement naissante, régnant sur une large zone, qu'on observe macroscopiquement. Les rotations individuelles sont beaucoup plus grandes, mais toujours pas organisées spatialement. L'incrément 3 montre une bande de cisaillement complètement développée, nettement plus étroite que la dimension du sous-volume comme le révèle le gradient de déplacement très concentré. On observe la coexistence d'une bande et de blocs quasi rigides au sein du sous-volume), et confirme la concentration des grandes rotations autour de la bande, plus fortes en son milieu mais la débordant assez nettement comme déjà observé plus haut.

La ligne du bas de la Figure 6 montre l'intensité des rotations dans des coupes verticales de l'échantillon complet, aux différents incréments. Les incréments 1 et 3 confirment les observations faites sur les sous-volumes, à savoir absence d'organisation dans le premier incrément, et forte concentration dans la bande dans l'incrément final. Cependant l'incrément 2, situé au pic, montre que les rotations sont organisées à l'échelle de l'échantillon, dans une bande large d'une quinzaine de grains, centrée sur ce qui deviendra la bande de cisaillement développée, nettement plus étroite, dans les incréments suivants. Il faut noter que l'observation des sous-volumes seulement ne permet pas de détecter cette phase d'organisation globale précoce, car elle se déroule à l'échelle de l'échantillon.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les développements récents de la micro-tomographie à rayons X ont rendu possible d'imager en 3D de manière non-destructive et non-invasive des échantillons de matériaux à des résolutions qui étaient tout simplement inimaginables voici vingt ans. Dans le contexte de la mécanique des sols, c'est un vieux rêve qui est devenu réalité : suivre individuellement *tous les grains* d'un échantillon en cours de déformation. La combinaison de cette nouvelle capacité d'imagerie, avec un savoir-faire expérimental permettant de mener à bien des essais mécaniques représentatifs sous faisceau RX d'une part, et un savoir-faire numérique en analyse par corrélation d'image d'autre part, est extrêmement puissante. Nous sommes capables aujourd'hui d'extraire du volume énorme de données produites par ces essais, de nouveaux éléments d'analyse des mécanismes de déformation à l'œuvre au cœur des échantillons, tout au long d'un essai. On peut ainsi observer l'évolution de ces mécanismes aussi bien lors de la phase initiale de montée rapide

de la résistance mobilisée, puis pendant que la déformation diffuse se développe, puis se localise et conduit finalement à un plateau caractérisé par une résistance résiduelle dégradée par rapport à la résistance de pic.

Un projet long terme qui découle naturellement de ces observations consiste à étudier l'évolution des contacts et leur rôle dans les mécanismes observés. Des travaux dans cet esprit ont été effectués en 2D par Calvetti *et al.* (1997) ; le passage au 3D est désormais possible.

D'un point de vue théorique, l'étude des bandes de cisaillement repose sur une approche de bifurcation, qui fait jouer à la loi de comportement du matériau un rôle clé dans la recherche d'une discontinuité spatiale de la vitesse de déformation. Cependant, c'est seulement avec des approches en milieux enrichis que la notion d'épaisseur de bande de cisaillement émerge des équations. Les données expérimentales produites ici sont pertinentes pour établir de telles approches.

Du point de vue de l'application, les résultats concernant le développement des bandes de cisaillement en 3D et leurs caractéristiques, par exemple l'épaisseur reliée à la taille des grains, sont importants. En effet la localisation de la déformation affecte souvent les ouvrages géotechniques, tels qu'excavations et pentes naturelles ou artificielles, digues et barrages, tunnels et galeries, forages, sites de stockage.

Remarque : une version en couleur de ce texte est disponible : http://l3sphnum.hmg.inpg.fr/HomepageS1/etageres/ICSMGE_Ando.pdf

5 REMERCIEMENTS

Ces études ont été rendues possibles par le financement attribué par l'ANR « blanche » à deux projets successifs, MicroMODEX (2005-2008) et GeoBridge (2009-2013) qui ont permis de créer l'installation de tomographie et de rassembler ou développer autour d'elle les compétences et outils nécessaires.

6 REFERENCES

- Alonso-Marroquin, F., and Vardoulakis, I. (2005) Micromechanics of shear bands in granular media. *Powders and Grains*, 701–704.
- Andò, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J., and Bésuelle, P. (2012a) Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotechnica*, 7(1), 1–13.
- Andò, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J., and Bésuelle, P. (2012b) Experimental micromechanics: grain-scale observation of sand deformation. *Géotechnique Letters*, <http://www.icvirtuallibrary.com/content/serial/geolett>.
- Calvetti, F., Combe, G., and Lanier, J. (1997) Experimental micromechanical analysis of a 2D granular material: relation between structure evolution and loading path. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2, 121–163.
- Hall, S.A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., and Bésuelle, P. (2010) Discrete and continuum experimental study of localised deformation in Hostun sand under triaxial compression using x-ray μCT and 3D digital image correlation. *Géotechnique*, 60(5), 315–322.
- Iwashita, K., and Oda, M. (2000) Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method. *Powder Technology*, 109, 192–205.
- Mühlhaus, H.B., and Vardoulakis, I. (1987) The thickness of shear bands in granular materials. *Géotechnique*, 37(3), 271–283.
- Sibille, L., and Froio, F. (2007) A numerical photogrammetry technique for measuring microscale kinematics and fabric in Schneebeli materials. *Granular Matter*, 9, 183–193.
- Viggiani G., and Hall, S.A. (2008) Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics. Keynote paper in: *Proceedings of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, IOS Press, 1, 3–26.