



**HAL**  
open science

## Dynamique de formation d'une bande de cisaillement lors d'un test biaxial

Thai Binh Nguyen, Antoine Le Bouil, Sean Mcnamara, Jérôme Crassous,  
Axelle Amon

► **To cite this version:**

Thai Binh Nguyen, Antoine Le Bouil, Sean Mcnamara, Jérôme Crassous, Axelle Amon. Dynamique de formation d'une bande de cisaillement lors d'un test biaxial. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. pp.68222. hal-03444861

**HAL Id: hal-03444861**

**<https://hal.science/hal-03444861>**

Submitted on 23 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Dynamique de formation d'une bande de cisaillement lors d'un test biaxial

T. B. NGUYEN, A. LE BOUIL, S. McNAMARA, J. CRASSOUS  
and A. AMON

Université de Rennes 1, Institut de Physique de Rennes (UMR UR1-CNRS 6251),  
Campus de Beaulieu, 35042 Rennes  
axelle.amon@univ-rennes1.fr

## Résumé

*Nous présentons des résultats expérimentaux concernant la dynamique de formation d'une bande de cisaillement au cours d'un test biaxial. Nous soumettons un milieu granulaire modèle, constitué de billes de verre, à une déformation uniaxiale et nous mesurons la répartition spatiale de la déformation au cours de la charge à l'aide d'une technique interférométrique de mesure de micro-déformations. Nous caractérisons l'hétérogénéité spatiale de cette déformation à l'aide d'un outil d'analyse d'image caractérisant l'anisotropie. Nous montrons à l'aide de cet outil l'existence d'une bifurcation montrant l'émergence d'une direction privilégiée dans la répartition de la déformation bien avant d'avoir atteint la contrainte seuil. Le maximum de l'indice d'anisotropie nous permet de caractériser de manière objective la localisation de la déformation en une bande de cisaillement permanente.*

## Abstract

*We present experimental results about the shear band formation dynamics in a biaxial test. An uniaxial deformation is applied on a confined model granular material constituted of glass beads. We measure the spatial repartition of the deformation using an interferometric method of measurement of micro-deformation. We characterize the spatial heterogeneities of the deformation by measuring the anisotropy of the observed pattern. This image analysis tool allows us to evidence a bifurcation showing the emergence of a preferred direction in the deformation well before the stress threshold. The maximum of the anisotropy index gives an objective quantity for the characterization of the localization of the deformation in a permanent shear band.*

**Mots clefs : bandes de cisaillement, localisation de la déformation, rupture, milieux granulaires, test biaxial, anisotropie**

## 1 Introduction

Un milieu granulaire est un milieu constitué d'un grand nombre de particules. De tels milieux se retrouvent dans de nombreux secteurs industriels (céréales, préparation de médicaments,...) ainsi que dans le génie civil (matériaux de construction) ou encore dans l'environnement (sable, roches,...). Selon les sollicitations mécaniques auxquels ces matériaux sont soumis, ils peuvent être assimilés à un solide, un liquide ou un gaz. Nous nous intéressons dans ce travail à un granulaire solide et à la manière dont ce matériau rompt lorsqu'on le soumet à une contrainte suffisamment importante.

En effet, une caractéristique des milieux granulaires est de présenter de la *localisation de la déformation* lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique suffisamment importante [1]. Les déformations se concentrent alors sur une zone d'épaisseur finie (d'une dizaine de taille de grains), où a lieu l'essentiel de la déformation, et appelée *bande de cisaillement*, le reste du matériau étant peu déformé [2, 3].

Un critère de rupture répandu pour décrire ce processus est le critère de Mohr-Coulomb qui prévoit l'apparition brutale d'un plan de cisaillement à partir d'une certaine valeur du rapport entre la contrainte déviatorique et la contrainte totale. Un tel modèle ne prévoit pas de précurseurs à la rupture, ni la position de la bande de cisaillement ou son épaisseur.

L'objectif de ce travail est d'étudier la dynamique de formation d'une telle bande de cisaillement lors d'un test biaxial. La possibilité d'avoir une mesure spatiale et temporelle repose sur une mesure originale de micro-déformations reposant sur la diffusion multiple de la lumière. Dans la suite, nous présentons d'abord le dispositif expérimental et la technique de mesure utilisée puis les résultats obtenus montrant que le processus de localisation peut être mis en évidence en caractérisant l'anisotropie de la répartition de la déformation durant la charge.

## 2 Expérience

L'originalité de notre dispositif expérimental est d'associer une technique optique interférométrique basée sur la diffusion multiple de la lumière (Diffusing Wave Spectroscopy, DWS) à un test biaxial en déformation plane.

### 2.1 Test biaxial

Le test biaxial en déformation plane consiste à placer un échantillon de matériau granulaire entre deux murs rigides parallèles, imposant une déformation nulle dans la direction transversale aux murs et à appliquer sur cet échantillon deux contraintes indépendantes  $-\sigma_{xx}$  et  $-\sigma_{yy}$  dans les deux autres directions [4] (voir Figure 1). Un des murs rigides est une plaque de verre, ce qui permet la visualisation des micro-déformations au sein de l'échantillon par DWS (voir partie 2.2).

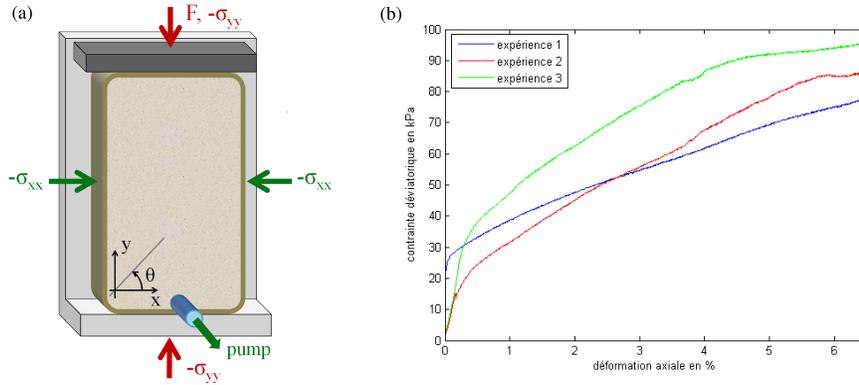


Figure 1: (a) Schéma du test biaxial. La contrainte latérale  $\sigma_{xx}$  est assurée par dépressurisation partielle de l'échantillon grâce à une pompe à vide. La contrainte normale  $\sigma_{yy}$  est due à la translation de la plaque supérieure grâce à une platine de translation pilotée par un moteur pas-à-pas. Un capteur de force placé entre la plaque supérieure et la platine de translation permet de mesurer la force  $F$  exercée sur l'échantillon. (b) Courbes de charge pour trois expériences réalisées avec une pression de confinement de 30 kPa et pour une préparation identique du matériau.

## 2.2 Diffusing Wave Spectroscopy (DWS)

La DWS est une méthode permettant d'extraire des informations quantitatives de la lumière diffusée par un milieu très diffusant. Pour de tels milieux, présentant des fluctuations d'indice optique, les ondes lumineuses se propageant au sein du matériau sont diffusées de multiples fois. Lorsque la lumière incidente est cohérente, l'intensité de la lumière rétro-diffusée présente des fluctuations formant des tavelures, appelées *speckle* (voir Figure 2(a)).

L'analyse de l'intensité de la lumière diffusée pour différents états du matériau nous permet de remonter à une mesure quantitative de la déformation au sein du matériau dans le voisinage du plan imagé sur la caméra [5]. L'analyse consiste à calculer une fonction de corrélation  $g_I$  de l'intensité diffusée entre deux états. Si  $I_1$  est l'intensité diffusée du matériau à l'état 1 et  $I_2$  l'intensité diffusée du matériau à l'état 2 alors la fonction de corrélation normalisée de l'intensité diffusée entre les états 1 et 2 est définie comme :

$$g_I^{(12)} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2} \sqrt{\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2}}, \quad (1)$$

où  $\langle \cdot \rangle$  représente une moyenne spatiale sur les pixels de la caméra. Plus précisément, cette moyenne est obtenue sur des zones de taille  $16 \times 16$  pixels de l'image initiale (voir Figure 2(a) et (b)), chacune de ces zones donnant alors un pixel de valeur  $g_I$  sur la carte de corrélation finale (voir Figure 2(c)).

Des images de speckle sont enregistrées tout au long de la charge à un taux d'une

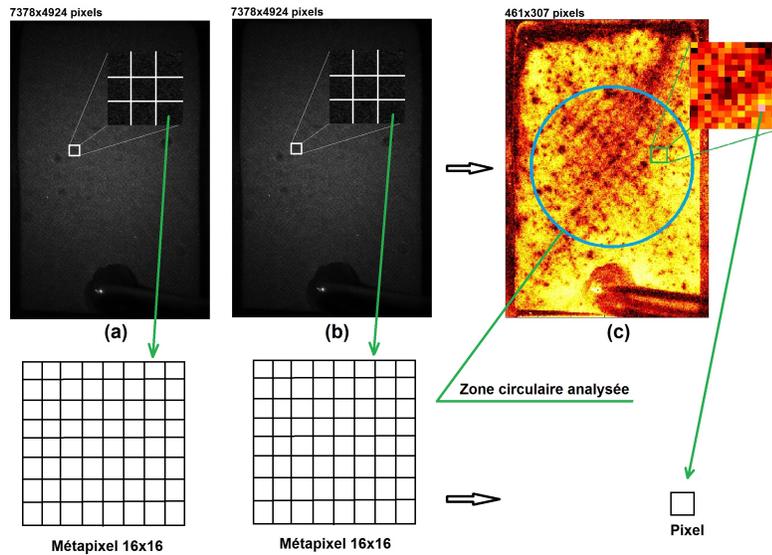


Figure 2: Images de speckle de l'échantillon dans les états 1 (a) et 2 (b). Ces images sont divisées en zones de  $16 \times 16$  pixels. Pour chacune de ces zones une valeur de la corrélation  $g_I^{(1,2)}$  est calculée. (c) Carte de corrélation obtenue à partir des images 1 et 2. Le cercle bleu indique la région utilisée pour l'analyse d'image (ROI).

image toutes les 3 secondes. Afin d'obtenir des informations sur la déformation de matériau, on compare chaque paires d'images successives (image  $i$  et image  $i + 1$ ). La déformation axiale du matériau qui correspond à l'image  $i$  est  $\varepsilon_i$  et celle qui correspond à l'image  $i + 1$  est  $\varepsilon_{i+1}$ . On calcule la fonction de corrélation  $g_I$ , définie par l'équation (1), pour chaque métapixel (zone de  $16 \times 16$  pixels). On obtient alors une carte de corrélation (carte des valeurs de  $g_I$ ), cette carte représente les déformations du matériau pour un incrément de déformation axiale  $\delta\varepsilon = \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i$ . La platine de translation ayant une vitesse de  $1\mu\text{m/s}$ , l'incrément de déformation entre chaque carte est  $\delta\varepsilon \simeq 3 \times 10^{-5}$ .

### 3 Analyse d'images

A partir des séries d'images de corrélation, on réalise des analyses en utilisant des outils de traitement d'images. L'outil que l'on présente ci-dessous mesure l'anisotropie du motif formé sur chaque image [6]. Il permet de déterminer la direction dans laquelle le signal est le plus présent. Pour cela, pour chaque image, un tenseur d'inertie mesurant la répartition spatiale des niveaux de gris est calculé. Son expression est donnée par:

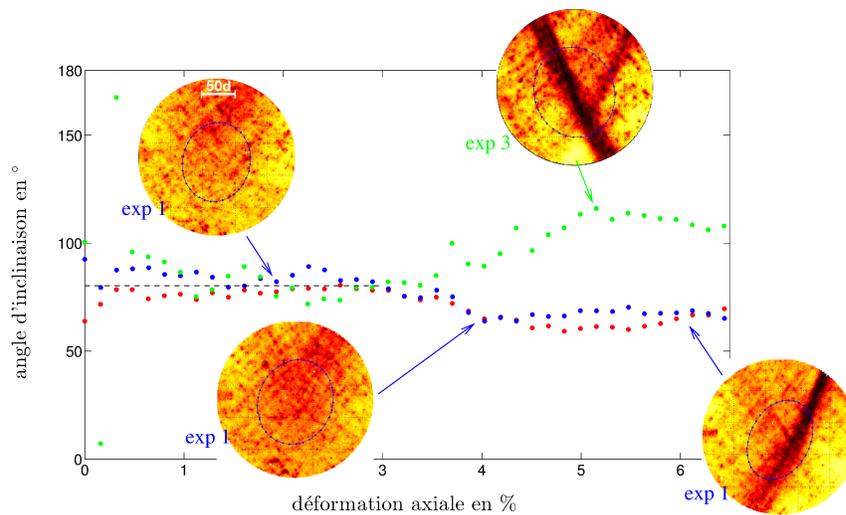
$$\bar{\bar{P}} = \sum_{(X,Y) \in ROI} I(X,Y) \begin{pmatrix} X^2 & XY \\ XY & Y^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

où  $(X, Y)$  sont les coordonnées de chaque pixel de la région d'analyse en prenant pour

origine le barycentre des niveaux de gris de cette région.

Le tenseur d'inertie correspondant à une zone d'analyse peut être représenté par une ellipse dont les directions des axes principaux sont données par les vecteurs propres du tenseur et leurs normes par les valeurs propres associées  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ ). On peut alors donner une mesure de l'anisotropie d'une image grâce à la quantité  $1 - \lambda_2/\lambda_1$ . Cet indice vaut 0 lorsque  $\lambda_1 = \lambda_2$  et atteint son maximum, 1, lorsque  $\lambda_2 \ll \lambda_1$ . On s'intéresse dans la suite à l'inclinaison du grand axe de l'ellipse par rapport à l'axe horizontal  $Ox$ , c'est à dire à l'angle caractéristique que présente la déformation sur les cartes de corrélation.

La Figure 3 présente l'angle d'inclinaison du grand axe de l'ellipse par rapport à l'horizontale en fonction de la déformation pour trois expériences. La zone d'analyse est circulaire et choisie au milieu de l'échantillon (voir Figure 2(c)). Les cartes de corrélation ont été moyennées pour l'analyse d'image: chaque image analysée correspond à une moyenne sur un incrément de déformation de  $\sim 10^{-3}$ .



**Figure 3:** Inclinaison de la direction principale d'anisotropie au cours de la charge pour trois tests biaxiaux différents (expériences 1 : bleu, 2 : rouge, 3 : vert). Inserts: ROI des cartes de corrélations moyennées pour une déformation axiale de 2, 4 et 6 % pour l'expérience 1 et 5.1% pour l'expérience 3.

Dans la première moitié de la charge, jusqu'à environ 3.5 % de déformation axiale, les hétérogénéités de déformation observées sont réparties relativement uniformément sur l'image, conduisant à un indice d'anisotropie faible (ellipse proche d'un cercle, voir Figure 3, insert à 2 %). Une légère assymétrie résiduelle ainsi qu'un gradient vertical de déformation font qu'un angle proche de  $80^\circ$  entre la direction principale d'anisotropie et l'horizontale est mesuré pendant tout le début de la charge, et cela quelque soit l'expérience (ligne horizontale pointillée sur la Figure 3).

A une valeur critique de la déformation axiale proche de 3.5 %, on observe claire-

ment une bifurcation : pour deux de nos expériences (symboles rouges et bleus sur la Figure 3), l'angle d'anisotropie bascule vers une valeur de  $65^\circ$  tandis que pour la troisième expérience (symboles verts), l'angle bascule vers la valeur symétrique par rapport à la verticale, proche de  $180 - 65 = 115^\circ$ . On observe donc une brisure de symétrie entre les deux inclinaisons possibles pour l'angle de la bande malgré la dissymétrie initiale. La localisation de la déformation en tant que telle, qui peut être identifiée par un plateau sur les courbes de charge, a lieu pour une déformation axiale proche de 6.5 %, et correspond à un maximum d'anisotropie.

## 4 Conclusion

Nous avons présenté des résultats expérimentaux mettant en évidence une bifurcation ayant lieu avant le maximum de la courbe de charge d'un milieu granulaire soumis à un test biaxial. Cette bifurcation caractérise l'anisotropie de la répartition spatiale de la déformation dans le matériau au cours de la charge. La localisation de la déformation se produit plus tard au cours de la charge, lorsque l'anisotropie mesurée atteint son maximum.

## References

- [1] *Statics and Kinematics of Granular Materials*, R. M. Nedderman (Cambridge University Press, 1992).
- [2] P. Bésuelle, and J. W. Rudnicki, *International Geophysics* **89**, 219-321 (2003).
- [3] J. Desrues, and G. Viggiani, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* **28**, 279 (2004).
- [4] A. Le Bouil, A. Amon, J.-C. Sangleboeuf, H. Orain, P. Bésuelle, G. Viggiani, P. Chasle, and J. Crassous, *Granular Matter* **16**, 1 (2014).
- [5] M. Erpelding, B. Dollet, A. Faisant, J. Crassous, and A. Amon, *Strain* **49**, 167-174 (2013).
- [6] R. Lehoucq, J. Weiss, B. Dubrulle, A. Amon, A. Le Bouil, J. Crassous, D. Amirano, and F. Graner, "Analysis of image vs. position, scale and direction reveals pattern texture anisotropy", *Frontiers in Physics*, **2**, (2015).