

# Caractérisation géométrique et vélocimétrique d'empilements granulaires par analyse d'image

J. Debayle<sup>1</sup>, J.-C. Pinoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CIS-LPMG UMR CNRS 5148, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, France, {debayle,pinoli}@emse.fr

**Résumé** — Ce travail porte sur le traitement et l'analyse d'images 2D et 3D d'empilements granulaires statiques et dynamiques permettant d'investiguer leur comportement mécanique. Dans un premier temps, une méthode de détection de voûtes dans des empilements statiques est présentée. Par la suite, une séquence d'images d'une population dynamique de grains est traitée afin d'en extraire un champ de vitesse. Ces caractéristiques géométriques et vélocimétriques fournissent des informations sur les propriétés physiques et mécaniques de ces empilements granulaires, nécessaires pour certaines applications industrielles.

**Mots clés** — Analyse d'image, champ de vitesse, empilement granulaire, flot optique multi-échelle.

## 1 Problématique

Différentes caractéristiques, telles les distributions des tailles de grains et de pores, portant sur des échantillons d'empilements granulaires modèles de grains de sable, peuvent être obtenues classiquement par analyse d'images 3D obtenues par tomographie à rayons X. Mais la détection de voûtes de grains, à l'origine du blocage des empilements granulaires pouvant engendrer des dysfonctionnements variés (écoulements discontinus, systèmes poreux hétérogènes, résistances mécaniques) soulève de nombreux problèmes d'analyse [1]. Par ailleurs, l'estimation du champ de vitesse d'empilements granulaires dynamique [2], soumis à différents types de contraintes mécaniques, permet d'accéder à des propriétés physiques spécifiques requises en génie des procédés pour des applications industrielles. Ce travail a donc pour objet de présenter deux chaînes de traitement et d'analyse d'image permettant d'accéder aux caractéristiques géométriques et vélocimétriques d'empilements granulaires.

## 2 Détection de voûtes

Différents échantillons ont été préparés après relaxation consécutive à des vibrations verticales de grains de sable (diamètre moyen 600  $\mu\text{m}$ ). Des images 3D (Fig. 1), présentant une résolution spatiale de 15  $\mu\text{m}$ , ont été obtenues pour chaque échantillon par tomographie X, au synchrotron de Grenoble. Ces images sont alors traitées pour en extraire les voûtes présentes afin de caractériser les propriétés physiques et mécaniques des différents empilements granulaires. Tout d'abord, chaque image 3D est seuillée puis filtrée par morphologie mathématique [3] pour éliminer le bruit résiduel. Ensuite, les grains sont segmentés (individualisés) et leurs surfaces de contacts sont extraites, en prenant en compte la concavité éventuelle des grains. L'analyse des surfaces de contacts permet de déduire quelques propriétés physiques (distributions de tailles de surface, coordinence) et conduit à la détection des voûtes. Des groupements de grains connectés entre eux sont alors constitués. Un 'groupement' est défini comme un ensemble de grains connexe présentant une aire de contact suffisante pour chaque couple de grains voisins. Chaque groupement est modélisé par une courbe reliant les barycentres de ses grains. Une analyse géométrique de ces courbes permet alors d'identifier les voûtes (Fig. 1).

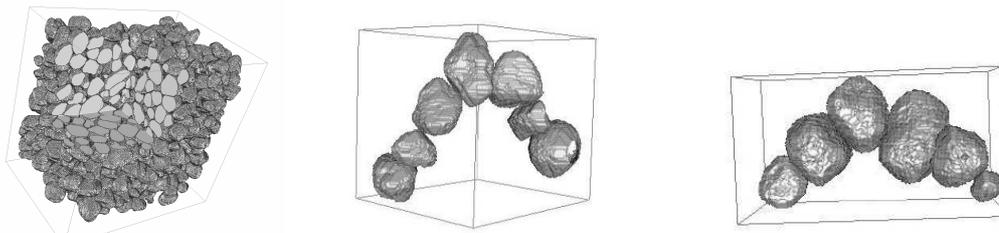


Figure 1 : Image 3D d'un empilement granulaire et deux exemples de voûtes détectées.

### 3 Estimation de champ de vitesse

Des échantillons de grains de sable sont soumis à différentes contraintes mécaniques (par vibration verticale). L'analyse des profils de vitesse des grains permet d'accéder à des propriétés physiques de ces empilements granulaires. Ainsi, une séquence d'images 2D est acquise par une caméra CCD ultra-rapide (5400 images/seconde) durant le processus de vibration et analysée afin d'accéder à ce champ de vitesse. Pour cela, une méthode de flot optique multi-échelle est mise en place [2]. Le flot optique [4] est basé sur deux hypothèses (conservation de l'intensité de la lumière et vitesse localement constante) et permet d'obtenir un champ dense de vecteurs vitesse. Néanmoins, cette approche ne permet pas de détecter avec une bonne précision à la fois les petits et les grands déplacements. Pour palier ce problème, une analyse multi-échelle, par représentation pyramidale des images, est mise en place. Le champ de vitesse est tout d'abord estimé à une échelle grossière (haut de la pyramide) puis raffiné jusqu'à l'échelle la plus fine de l'image (bas de la pyramide). Par conséquent, le champ de vitesse sur une séquence d'image donnée peut-être estimé par analyse des paires d'images successives (Fig. 2).

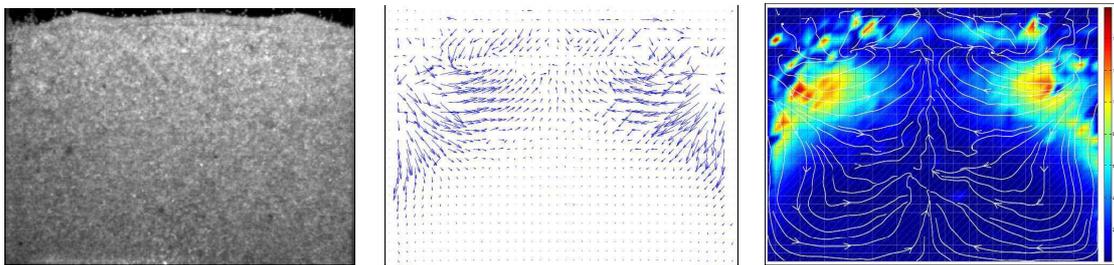


Figure 2 : Exemple d'image à  $t=20s$  et champ de vitesse (vecteurs + lignes de courant) calculé durant 20s.

Ce résultat numérique montre l'apparition de deux rouleaux de convection et est en accord avec les observations expérimentales. A noter que cette méthode 2D d'estimation de champ de vitesse par analyse d'image est facilement transposable au cas 3D.

### 4 Conclusions

Outre l'accès à différentes caractéristiques géométriques, telles les distributions des tailles de grains et de pores, portant sur des échantillons d'empilements granulaires modèles de grains de sable, l'analyse d'image permet également d'identifier plus finement la structure interne (notamment topologique) de ces empilements. Dans ce papier, des voûtes ont été détectées dans des images 3D acquises par tomographie X. L'analyse d'image a également permis d'estimer des champs de vitesse sur des empilements granulaires soumis à des contraintes mécaniques (vibrations verticales) par une méthode de flot optique multi-échelle. Ces différentes analyses permettent d'accéder à des propriétés physiques et mécaniques, lesquelles sont requises pour l'automatisation et le contrôle des procédés pour des applications industrielles.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier leurs partenaires du LPMG (UMR CNRS 5148), ENS des Mines de Saint-Étienne et du SIMAP-LTPCM, INPGrenoble avec qui ils ont collaboré sur ces travaux.

### Références

- [1] L.A. Pugnaloni and G.C. Barker. *Structure and distribution of arches in shaken hard sphere deposits*. Physica A, 337:428-442, 2004.
- [2] J. Debayle, A. Raihane, A. Belhaoua, O. Bonnefoy, G. Thomas, J. M. Chaix, and J. C. Pinoli. *Velocity field computation in vibrated granular media using an optical flow based multiscale image analysis method*. Image Analysis and Stereology, 28:35-43, 2009.
- [3] J. Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, 1982.
- [4] B. D. Lucas, T. Kanade. *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. Vancouver, Canada, 674-679, 1981.