CSMA 2011
10e Colloque National en Calcul des Structures
9-13 Mai 2011, Presqu'île de Giens (Var)

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

J. Debayle[1], J.-C. Pinoli[1]

[1] *CIS-LPMG UMR CNRS 5148, Ecole Nationale Supérieure des Mines de 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 voûte 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 disfonctionnements variés (écoulements discontinus [1], systèmes poreux hétérogènes, résistances mécaniques) soulève de nombreux problèmes d'analyse [2]. Par ailleurs, l'estimation du champ de vitesse d'empilements granulaires dynamique [3], 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

Nous nous sommes attachés dans ce travail à développer les caractérisations géométriques de lignes de voûtes, en étudiant physiquement un système de grains de sables de taille suffisante (diamètre moyen de 600 μm) pour que les effets des forces interfaciales soient négligeables devant la force de pesanteur.

2.1 Réalisation et préparation des images

Les expériences sont menées avec un sable aux grains arrondis de diamètre moyen, mesuré par granulométrie laser, de 641 μm avec un coefficient de dispersion, span = (d90% - d10%) / d50% , de 0,683. Les échantillons sont constitués de tubes en polystyrène transparent de diamètre intérieur 13 mm et de hauteur 100 mm remplis de sable sur une hauteur de 14 mm. Différents échantillons ont été préparés par pluiviation de grains de sable puis soumis à des vibrations verticales. Trois échantillons préparés sont vibrés pendant 90 secondes à la fréquence fixe de 60 Hz et à une accélération adimensionnée, Γ, respectivement égale à 1,2 - 2 et 15. Connaissant la masse de sable dans les tubes, une simple mesure du volume apparent permet de déterminer la compacité globale de l'échantillon pendant et après la période de vibration. Les échantillons sont ensuite figés dans une résine. Des images 3D (Fig. 1) présentant une résolution spatiale de 15 μm, ont été obtenues pour chaque échantillon par tomographie X, au synchrotron de Grenoble.

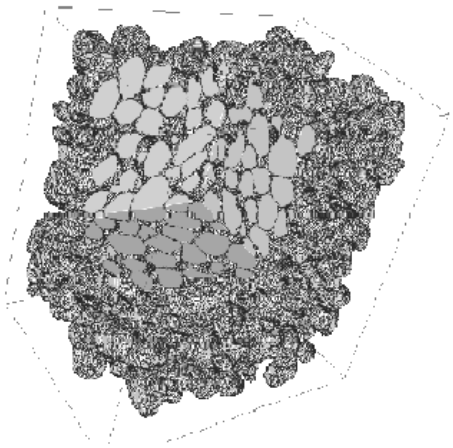
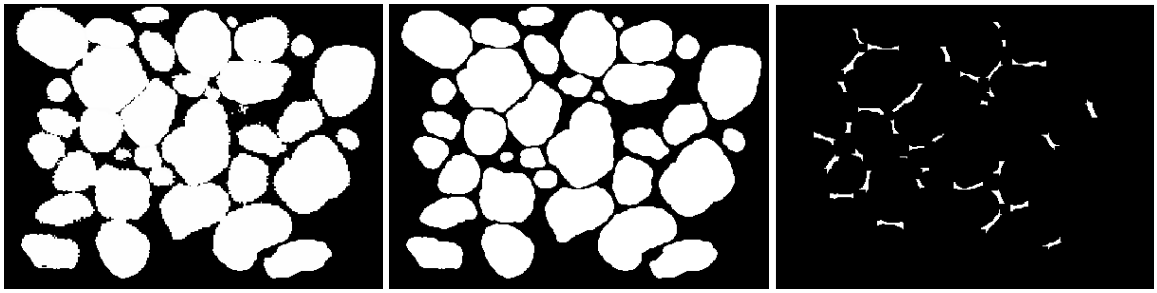


FIG. 1 – Sous-volume 3D de grains de sables.

Par la suite, différentes étapes de traitement et d'analyse ont été réalisées sur ces images 3D pour détecter les surfaces de contacts inter-grains qui permettront d'identifier les voûtes [4].

2.2 Détection et analyse des surfaces de contact

Tout d'abord, chaque image 3D est seuillée (Fig. 2-a) puis filtrée par morphologie mathématique [5] pour éliminer le bruit résiduel. Ensuite, les grains sont individualisés (Fig. 2-b). Cette étape nécessite une déconnexion des grains qui est réalisée par ligne de partage des eaux [6] contraintes par les minima de la fonction distance [7] de l'image seuillée. Les surfaces de contacts (Fig. 2-c) entre les différents grains peuvent alors être extraites par différence entre l'image seuillée (Fig. 2-a) et l'image des grains déconnectés (Fig. 2-b), en prenant en compte la concavité éventuelle des grains et la distance inter-grains [4]. La figure 2 illustre en 2D ce processus d'extraction des surfaces de contacts.



(a) Image seuillée (b) Déconnexion des grains (c) Surfaces de contact

FIG. 2 – Extraction des surfaces de contacts (c) par différence des images de grains connectés (a) et déconnectés (b).

L'analyse des surfaces de contacts permet de déduire quelques propriétés physiques/mécaniques [8] telles que la distribution des surfaces (Fig. 3), la coordinence… et conduit à la détection des voûtes.

En analysant la figure 3, la surface moyenne d'un contact correspond à 4% de la surface moyenne d'un grain (dmoyen = 641 μm). Par ailleurs, le nombre de petits contacts augmente lors de la dilatation, d'où une surface de contact moyenne plus faible.

2.3 Extraction des voûtes

A partir des images de grains séparés et des images des contacts apparents, des groupements de grains fortement connectés entre eux sont constitués. Nous définissons alors un 'groupement' comme un ensemble de grains connexes présentant une aire de contact suffisante (supérieure à un certain seuil fonction de la taille des surfaces de contact et des grains). Tous les groupements possibles dans l'empilement

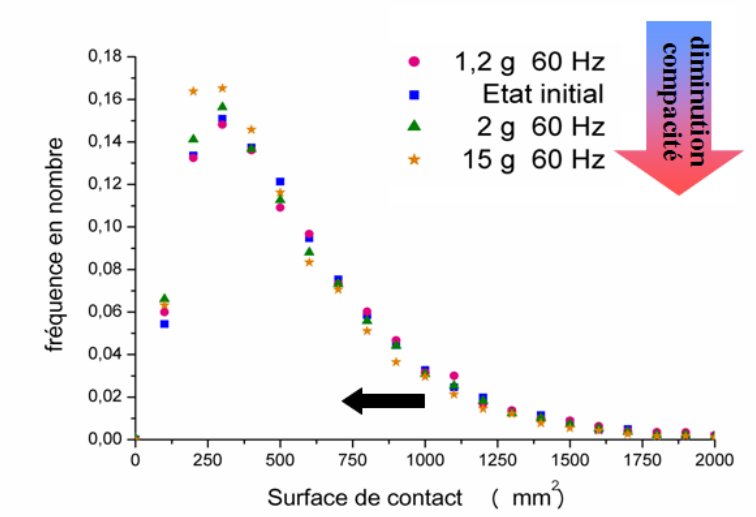


FIG. 3 – Distribution en nombre des surfaces de contacts.

3D sont alors identifiés un par un, car susceptibles d'appartenir à une voûte. Considérant uniquement les voûtes constitués d'un seul arc de cercle, nous allons chercher à extraire des structures à la fois rectilignes et mécaniquement stables des groupements projetés dans le plan (O ; x, y). Pour ce faire, les grains et les surfaces de contacts sont modélisés par leur centre de gravité. Les barycentres des grains appartenant à une telle structure sont alors calculés. Les angles entre les droites passant par les barycentres des surfaces de contact et ceux des grains sont ensuite calculés donnant lieu à des angles entre grains ou entre surfaces de contact (Fig. 4).

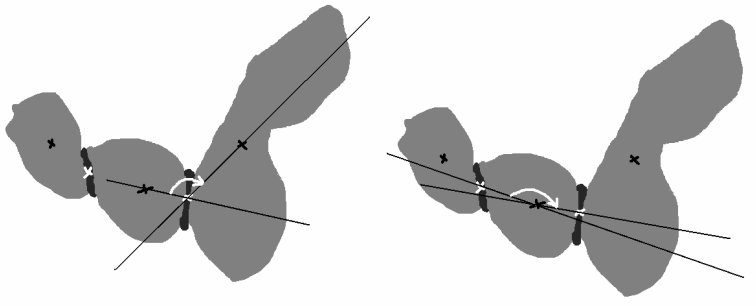


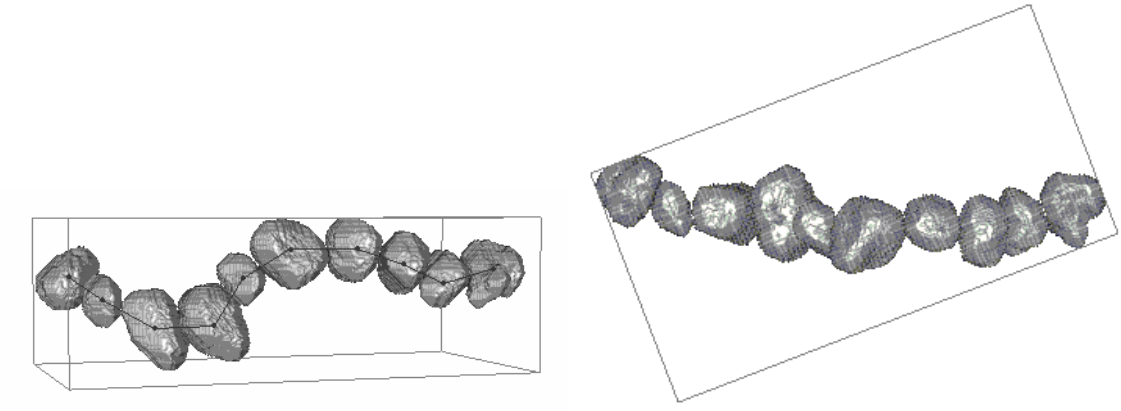
FIG. 4 – Angle entre grains (en gris) et surfaces de contact (en noir).

La méthode de détection des groupements rectilignes et mécaniquement stables explore de manière itérative, à partir d'un grain sélectionné, ces deux types d'angle pour agréger les grains, un à un, au groupement en construction. La figure 5 illustre la détection d'un groupement rectiligne.

Une fois les groupements de grains rectilignes détectés, nous cherchons à repérer et isoler les parties correspondantes à des configurations géométriques en arc de cercle. Pour ce faire, la ligne reliant les barycentres des grains est analysée. Détecter les voûtes revient donc à détecter les minima de cette courbe et extraire la structure formée par les grains se trouvant entre deux minima successifs, c'est-à-dire présentant une concavité tournée vers le bas (dans le sens de la pesanteur).

3 Estimation de champ de vitesse

Dans cette partie, l'objectif est d'estimer le champ de vitesse d'un milieu granulaire (de grains de sable) soumis à différentes contraintes mécaniques. Cela permettra d'accéder aux dimensions de la région fluidisée du milieu qui correspond à des propriétés spécifiques requises pour l'automatisation et le contrôle des procédés pour des applications industrielles.



(a) Groupement de grains (b) Projection dans le plan (O ; x, y)

FIG. 5 – Détection d'un groupement de grains (a) rectiligne dans le plan (O ; x, y) (b).

3.1 Dispositif expérimental et acquisition des images

Des parallépipèdes en polystyrène transparent de dimensions 40 x 80 x 80 mm sont remplis de sable, par pluivation, sur une hauteur de 60 mm. Une fois les empilements initiaux préparés, les échantillons sont vibrés verticalement par un pot vibrant [9]. Le pot vibrant (Tira S513) est piloté par un contrôleur de vibrations sinusoïdal (Bruel&Kjäer DSC4) et un amplificateur (tira BAA120). Une boucle d'asservissement est réalisée grâce à un accéléromètre (Bruel&Kjäer 4371V) qui mesure en temps réel la fréquence et l'accélération effectives de la vibration produite par le pot vibrant et renvoie l'information au contrôleur pour ajustement (Fig. 6).

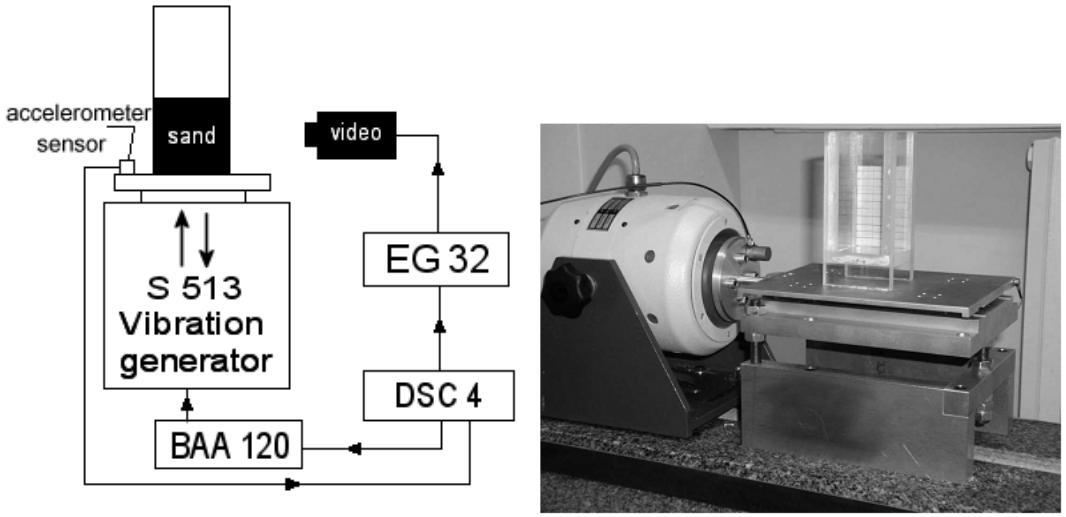


FIG. 6 – Schéma du montage expérimental.

A l'aide d'une caméra vidéo CCD ultra-rapide (JAI, CMOS CV-A33) de fréquence maximale 5400 images/s et de champ 494 x 660 pixels, les mouvements au contact de la paroi orthogonale à l'axe de vibration sont filmés et enregistrés. Afin d'avoir une bonne prise d'image, la caméra est reliée à un boîtier de synchronisation EG 32 de chez R&D Vision, lui même relié au pot vibrant.

3.2 Calcul du champ de vitesse

Le flot optique [10] est une estimation du mouvement apparent d'objets dans une séquence d'images. Cependant, le terme flot optique est spécifiquement utilisé pour décrire un champ de vitesse 2D dense à partir de la projection d'une scène 3D sur le plan image. Différentes méthodes ont été étudiées dans la littérature pour déterminer le flot optique telles que les méthodes basées sur la phase [11], l'énergie [12], la correspondance de régions [13] et les méthodes différentielles [10, 14]. Dans des articles de synthèse

[15, 16], différentes méthodes ont été evaluées et il a été conclu que la méthode différentielle proposé dans [14] fournissait les meilleurs résultats. Par conséquent, le champ de vitesse calculé dans ce travail est estimé par la méthode différentielle de [14].

Comme différentes techniques différentielles, cette méthode est basée sur l'hypothèse de conservation de l'intensité lumineuse, c"est-à-dire que l'intensité des objets dans une séquence d'image I ne change pas de manière significative entre deux images successives aux temps t et $t+dt$:

$$I(x,y,t) = I(x+dx, y+dy, t+dt) \tag{1}$$

où ${}^t(x,y)$ et ${}^t(dx,dt)$ sont des vecteurs représentant la localisation et le déplacement, respectivement, du pixel ; ^{t} dénote l'opérateur de transposition de matrice (vecteur).
Le système différentiel du flot optique est le suivant :

$$(I_x, I_y)\,{}^t(v_x, v_y) + I_t = 0 \tag{2}$$

où I_x, I_y et I_t représentent les dérivées partielles en espace et en temps de $I(x,y,t)$, respectivement et $v = {}^t(v_x, v_y)$ est le vecteur vitesse à la position et à l'instant (x,y,t).
C'est un système différentiel d'une équation à deux inconnues v_x, v_y et ne peut donc être résolu. Ceci exprime le problème d'ouverture des algorithmes de flot optique. Par conséquent, d'autres équations sont nécessaires pour résoudre le système différentiel, en imposant des contraintes additionnelles. Lucas and Kanade [14] font l'hypothèse que la vitesse est localement constante dans un voisinage W de taille n pixels centré en (x,y). En indexant les pixels du voisinage $1,\ldots,n$, on obtient un système surdimensionné :

$$\begin{bmatrix} I_{x_1} & I_{y_1} \\ I_{x_2} & I_{y_1} \\ \vdots & \vdots \\ I_{x_n} & I_{y_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{t_1} \\ I_{t_2} \\ \vdots \\ I_{t_n} \end{bmatrix} = 0 \tag{3}$$

Ce système peut être écrit sous forme matricielle :

$$Av + b = 0 \tag{4}$$

où A, v, b représentent la matrice des dérivées partielles spatiales, le vecteur vitesse et le vecteur de dérivée partielle temporelle, respectivement.
Pour résoudre ce système d'équations, la méthode des moindres carrés est utilisée :

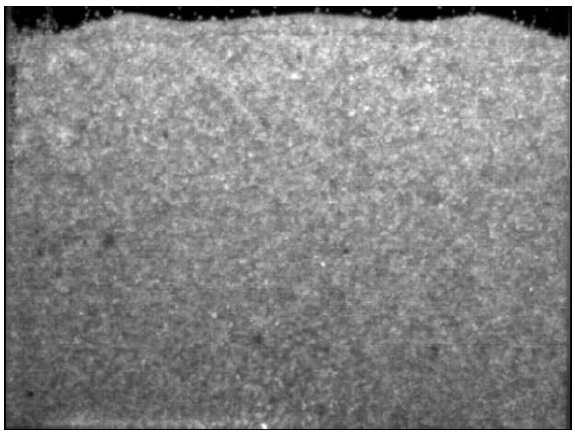
$$v = ({}^tAA)^{-1}[{}^tA.(-b)] \tag{5}$$

Il existe un compromis entre la précision et la robustesse de la méthode lors de la sélection de la taille du voisinage W. Ainsi, une méthode multiéchelle et itérative est proposée [17]. La représentation multiéchelle est fournie par une pyramide Gaussienne [18]. Ainsi le flot optique est tout d'abord calculé à une échelle grossière (de faible résolution, i.e. à un niveau L élévé de la pyramide) puis itéré pour assurer la stabilisation de la solution. Le champ de vitesse est ensuite appliqué et interpolé au niveau suivant de la pyramide et le flot optique est à nouveau calculé. Cette boucle est réalisée jusqu'au niveau de plus haute résolution (i.e. au niveau le plus bas de la pyramide). Cette méthode de flot optique multiéchelle a été validée [3] à partir de différents tests sur des séquences réelles et sythétiques pour lesquels les champs de déplacement sont connus.

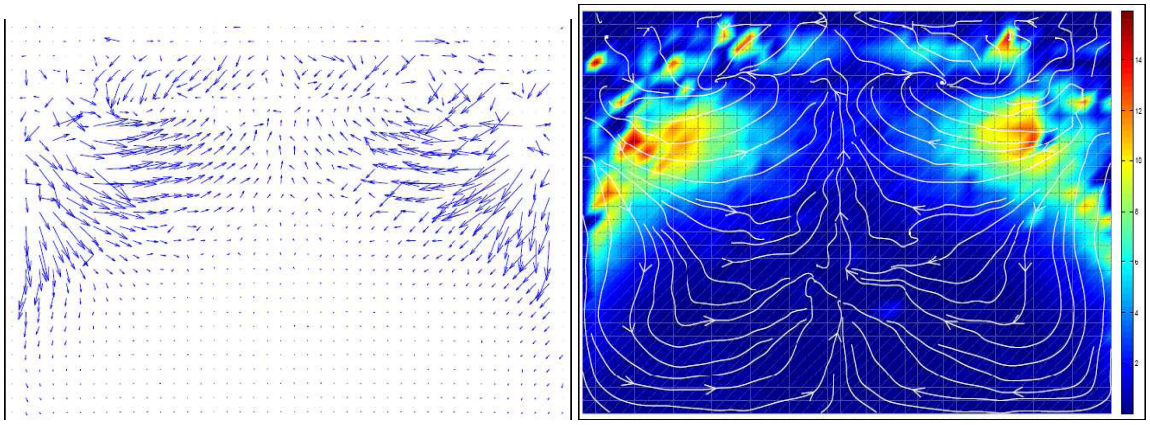
La figure 7 montre le déplacement calculé pour une séquence d'images de 20s. Les résultats obtenus sont en accord avec les observations expérimentales.

3.3 Analyse quantitative du champ de vitesse

Dans les expériences de vibration réalisées, une étude consiste à augmenter la valeur de l'accélération relative Γ à partir de 0, à une fréquence fixe f=50 Hz. Différents comportements peuvent donc être



(a) image à $t = 20\,s$



(b) champ de vecteurs vitesse (c) lignes de propagation

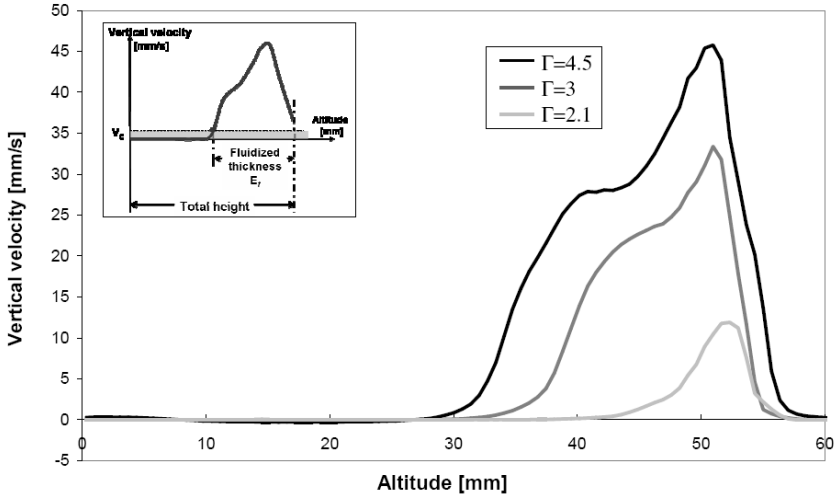
FIG. 7 – Calcul du champ de vitesse d'un milieu granulaire vibré pendant 20 s montrant deux rouleaux convectifs.

observés en fonction de Γ [9]. L'objectif est de mesurer le champ de vitesse des grains et d'accéder à l'épaisseur de la région fluidisée E_f (à une fréquence fixe f) en fonction de l'accélération Γ. Pour cela, la caméra CCD est calibrée afin d'enregistrer les images à une fréquence de 50 images par seconde. Pour déterminer l'épaisseur E_f de la zone fluidisée pour chaque accélération Γ, un seuil de vitesse est défini. Lorsque le seuil de 0.06 mm/s est dépassé, le milieu granulaire est dit fluidisé. Pour chaque niveau d'accélération, plusieurs paires d'images sont analysées par la méthode. Les champs de vitesse résultants sont moyennés puis, pour chaque niveau d'accélération, un profil de vitesse est déduit (Fig. 8-a).
Pour toutes ces analyses, le niveau de pyramide est fixée à $L = 2$ et la taille de la fenêtre (voisinage) à $W \approx 3d_{4,3}$.

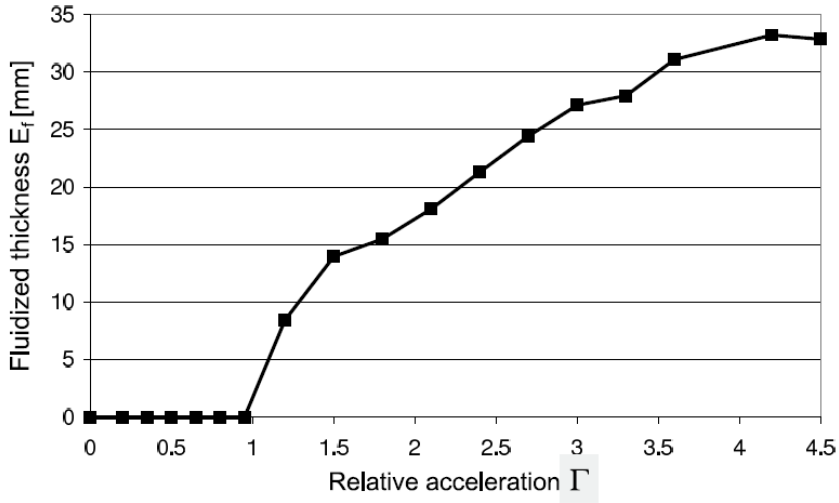
La figure 8-b montre l'évolution de l'épaisseur de la région fluidisée en fonction de l'accélération relative Γ pour un milieu granulaire vibré à la fréquence f=50 Hz.

4 Conclusion

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 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 aussi 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'optimisation et le contrôle des procédés pour des applications industrielles.



(a) Profil de vitesse d'un milieu granulaire de hauteur initiale $H_i = 60\,mm$ vibré horizontallement suivant trois accélérations différentes. Les profils montrent une zone plate et un large pic correspondant respectivement à la région basse solide et la région haute fluidisée. L'encart illustre la notion d'épaisseur de zone fluidisée obtenu par seuillage sur les profils vitesse



(b) Evolution de l'épaisseur fluidisée en fonction de l'accélération relative Γ du milieu granulaire de hauteur initiale H_i =60 mm. Un début de fluidisation est observé pour $\Gamma = 1$ et une saturation pour des accélérations élévées

FIG. 8 – Description quantitative du champ de vitesse d'un milieu granulaire.

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] J.E. Mattsson and P.D. Kofman. Method and appartus for measuring the tendency of solid biofuels to bridge over openings. *Biomass and Bioenergy*, 22 :179–185, 2002.

[2] L.A. Pugnaloni and G.C. Barker. Structure and distribution of arches in shaken hard sphere deposits. *Physica A*, 337 :428–442, 2004.

[3] 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.

[4] C. Polo. Etude de la structure des empilements de grains de sable par tomographie x. Master's thesis, Ecole des Mines de Saint-Étienne, France, 2005.

[5] J. Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London, 1982.

[6] S. Beucher and C. Lantuejoul. Use of watersheds in contour detection. In *International Workshop on Image Processing, Real Time Edge and Motion Detection/Estimation*, volume 2, pages 1–12, Rennes, France, 1979.

[7] G. Borgefors. On digital distance transforms in three dimensions. *Computer Vision and Image Understanding*, 64(3) :368–376, 1996.

[8] J.M. Missiaen and G. Thomas. Contact analysis in grain mixtures. *Acta Stereologica*, 8(2) :181–186, 1999.

[9] A. Raihane, O. Bonnefoy, J.-L. Gelet, J.-M. Chaix, and G. Thomas. Experimental study of 3d dry granular medium submitted to horizontal shaking. *Powder technology*, 190(1-2) :252–257, 2009.

[10] B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determinig optical flow. *Artificial Intelligence*, 17 :185–203, 1981.

[11] D.J. Fleet. *Measurement of Image Velocity*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1992.

[12] D.J. Heeger. Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal on Computer Vision*, 1 :279–306, 1988.

[13] P. Anandan. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal on Computer Vision*, 2 :283–310, 1989.

[14] B.D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proceedings of the Imaging Understanding Workshop*, 1981.

[15] J.L. Barron, D.J. Fleet, and S.S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. In *International Journal of Computer Vision*, volume 12, pages 43–77, 1994.

[16] B. Galvin, B. McCane, K. Novins, and S. Mills. Recovering motion fields : An evaluation of eight optical flow algorithms. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, pages 195–204, 1998.

[17] J.Y. Bouguet. Pyramidal implementation of the lucas-kanade feature tracker. Technical report, Intel Corporation, Microprocessor Research Labs, 2000.

[18] P.J. Burt and E.H. Adelson. The laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Transactions on Communications*, 31(4) :532–540, 1983.