

ESPCI Paris
Projet scientifique en équipes : Compaction de dés
Matériel et méthodes

Matthieu AUCOUTURIER, Augustin MALLER et Côme THILLAYE DU BOULLAY

1 Montage

Le montage développé dans ces travaux est constitué d'une cuve en plexiglas à base carrée de 16.5cm de côté. La cuve est installée sur des rails métalliques et mise en mouvement par un actionneur électrique. L'actionneur est commandé par un module Controlino Mini, alimenté par un générateur de tension continue à 24V.

Les éléments constitutifs du système actionneurs sont les suivants :

- Vérin électrique SMC 43N Tige filetée, 24V cc, 100mm/s, course 100mm, ref : LDZBL3M-100A3L
- Câble SMC, longueur 2m, à utiliser avec Série CN3, ref : LC3F2-1-C3-02-1
- Câble SMC, longueur 2m, à utiliser avec Série CN2, ref : LC3F2-1-C2-02-1
- Câble d'alimentation SMC, longueur 2m, à utiliser avec Série CN1, ref : LC3F2-1-C1-02-1
- Contrôleur de moteur c.c. Monophasé, 24 V c.c., 2,3 A, ref : LC3F212-5A5B

2 Protocole expérimental

Dans un premier temps il faut remplir la cuve de dés en vrac. Pour cela il faut remplir un cylindre en plexiglas de diamètre plus fin que la cuve et placé dans celle-ci. Le cylindre est retiré en un coup sec ce qui fige le système en désordre. On met ainsi environ 11000 dés de 5mm de côté et de masse moyenne 125mg dans la cuve.

La controlino est ensuite allumée. Le montage secoue la cuve linéairement avec sa force maximale (la

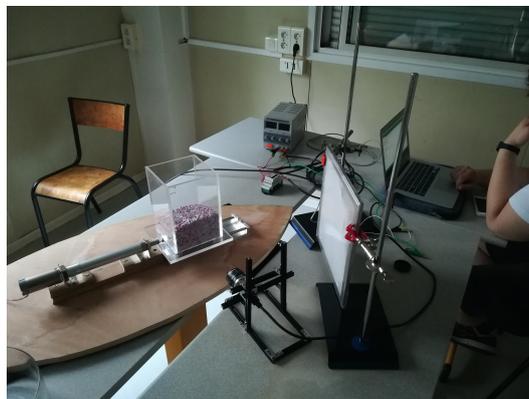


FIGURE 1 – Photographie du premier montage (le second ne se différencie que par un support métallique plus solide du système cuve/actionneur).

vitesse n'est pas contrôlable et atteint trop rapidement son maximum pour que l'on puisse jouer sur le temps de réponse de l'actionneur). Un aller-retour de l'actionneur dure typiquement moins d'une seconde. Des pauses sont effectuées selon une répartition logarithmique pour permettre l'acquisition des photos. Une expérience comprend ainsi 30 pauses, après 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7500, 10000, 20000 et 30000 chocs. (voir code arduino joint).

3 Protocoles d'analyse

3.1 Compacité surfacique

La compacité surfacique est le premier indicateur utilisé. Elle se calcule par :

$$\text{compacité surfacique} = \frac{\text{surface occupée par des dés}}{\text{surface totale}} \quad (1)$$

La compacité surfacique augmente donc avec l'ordre dans notre système.

Pour la mesurer, on analyse les images sous Matlab comme indiqué sur la figure 2 : on recadre l'image brute (en niveaux de gris) pour se débarrasser des bords, avant de la binariser avec un seuil optimal pour minimiser l'effet des ombres et des reflets. On identifie ensuite les points des dés à l'aide la fonction *imfindcircles*. Cette fonction détecte tous les ronds d'une taille définie en argument. Les points détectés sont enfin remplacés par des carrés blancs de taille identique. Ces étapes reviennent donc globalement à effacer les points des dés.

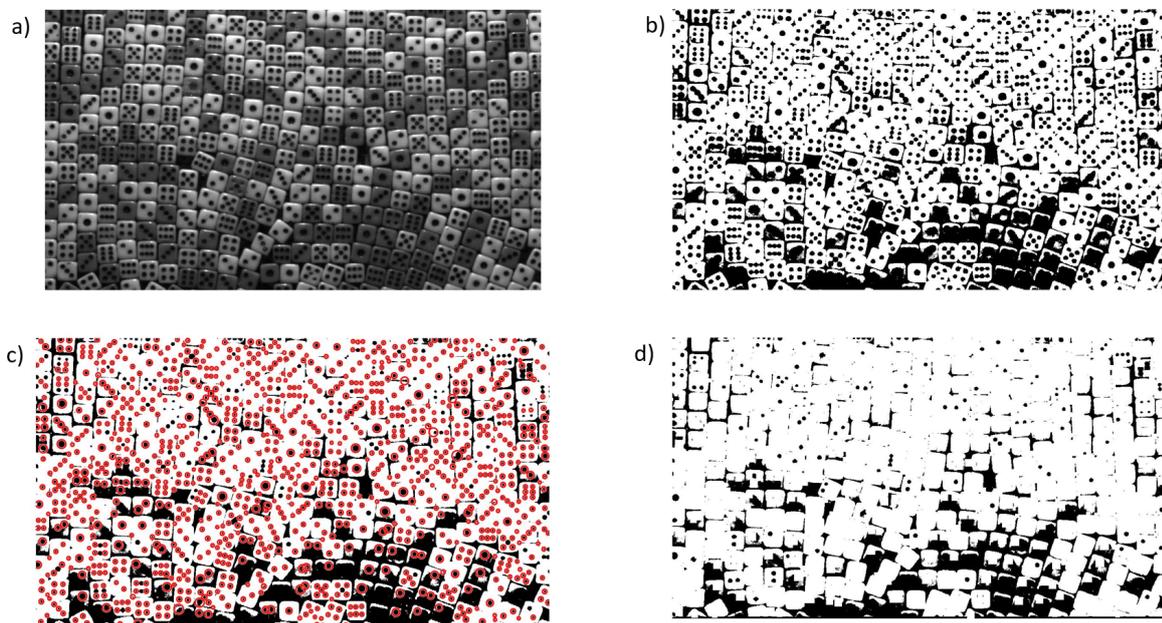


FIGURE 2 – Etapes du traitement d'image sous Matlab pour le calcul de la compacité surfacique : a) Image brute b) Image binarisée c) Détection de cercles sur l'image binarisée à l'aide de la fonction *imfindcircles* d) Image après remplacement des points détectées par des pixels blancs

Le calcul de la compacité surfacique revient alors simplement à calculer le rapport du nombre de pixels blancs sur le nombre total de pixels.

On estime une erreur sur la compacité surfacique en comptant le nombre de points non détectés par la fonction *imfindcircles*. On trouve ainsi une erreur typique de ± 0.01 sur les valeurs de compacité surfacique.

3.2 Modèle énergétique

On utilise ImageJ pour mesurer sur les photos produites par l'expérience la surface non occupée par les trous, en retranchant à la surface totale celle occupée par les dés. On mesure également la hauteur moyenne des trous et la hauteur de la surface supérieure. Ces éléments permettent de remonter à l'énergie potentielle $E = mgz$ supplémentaire par rapport à un cas idéal parfaitement compact. On modélise par ailleurs le cas idéal en prenant en compte les 'trous' nécessairement induits par la géométrie du fond (cf figures de l'article).

3.3 Orientation

Un des principaux objectifs est la détermination de l'orientation surfacique des dés. Nous souhaitons mettre en évidence la présence de deux orientations principales : une suivant l'inclinaison du fond, l'autre horizontale. C'est en effet ce que l'on semble observer à l'oeil.

Pour cela, nous avons dans un premier temps cherché un moyen d'automatiser la détection de l'orientation. Nous utilisons ImageJ, et plus précisément le plugin OrientationJ, qui permet a priori ce genre d'analyse. Nous sélectionnons sur les photos de chaque manipulation la zone remplie de dés (en éliminant donc le fond), et nous appliquons une analyse *Distribution*. Nous sélectionnons une fenêtre σ de 40 px, qui correspond à la dimension d'un côté de dés sur nos images. Nous obtenons alors une courbe de répartition angulaire. Cependant, le programme ne semble pas détecter les structures métastable pour un fond plat, bien qu'on constate une tendance globalement convergente vers une orientation particulière lorsque le nombre de chocs augmente, au sein même d'une manipulation. Cette absence de détection s'amplifie en présence de fond incliné. Nous pensons que cette absence provient du fonctionnement de la fenêtre de détection ou d'une particularité de l'analyse que nous n'avons pas comprise.

Afin d'obtenir malgré tout une idée de la répartition de l'orientation angulaire, nous effectuons alors une estimation à la main. Pour cela, on estime la proportion de dés dans une certaine orientation en mesurant l'aire associée aux dés dans cette configuration, et en la divisant par l'aire totale. Nous reproduisons ces mesures sur l'ensemble des manipulations pertinentes, puis nous moyennons les résultats.

4 Bibliographie

- [1] K. Asencio et al, *Experimental Study of Ordering of Hard Cubes by Shearing*, Physical Review Letter, **119**, 22802 (2017)
- [2] D. Bi et al, *The Statistical Physics of Athermal Materials*, Annu. Rev. Condens. Matter Phys., **6** :63–83 (2015)
- [3] A. Donev et al., *Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids*, Science, **Vol 303**, 990-993 (2004)
- [4] J. Baker et al., *Maximum and minimum stable random packings of Platonic solids*, Physical review **E 82**, 061304 (2010)