



HAL
open science

Écoulements granulaires confinés : effet de l'anisotropie de forme des grains

Antonio Pol, Riccardo Artoni, Patrick Richard, Fabio Gabrieli

► **To cite this version:**

Antonio Pol, Riccardo Artoni, Patrick Richard, Fabio Gabrieli. Écoulements granulaires confinés : effet de l'anisotropie de forme des grains. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. pp.169-175. hal-04350139

HAL Id: hal-04350139

<https://hal.science/hal-04350139v1>

Submitted on 22 Dec 2023

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.

Écoulements granulaires confinés : effet de l'anisotropie de forme des grains

A. Pol^{a,b}, R. Artoni^a, P. Richard^a, F. Gabrieli^b

a. MAST/GPEM, Université Gustave Eiffel, F-44344 Bouguenais, France (antonio.pol@univ-eiffel.fr)

b. Dept. ICEA, Università degli Studi di Padova, via Ognissanti 39, 35129 Padova, Italy

...

Résumé :

Dans ce travail, nous analysons des milieux granulaires constitués de particules de forme anisotrope en conditions d'écoulement hétérogènes et confinées. Les expériences sont réalisées dans une cellule de cisaillement annulaire avec une paroi de fond rotative et une paroi supérieure permettant le confinement vertical du milieu. Les échantillons granulaires sont composés de sphérocyindres avec trois rapports d'aspect différents. La cinématique ainsi qu'une statistique de l'orientation des particules sont déterminées au moyen d'un algorithme de "particle tracking". Premièrement, nous observons une influence négligeable de la forme des particules sur les profils de vitesse translationnelle. Inversement, la vitesse angulaire est significativement affectée par la forme des particules. En particulier, nous montrons que la propension d'une particule à tourner diminue de manière systématique avec son élongation. Nous portons ensuite notre attention sur l'orientation des particules. En conditions d'écoulement, ces dernières subissent une réorientation collective et se disposent, en moyenne, avec un certain angle par rapport à la direction d'écoulement. Une phase plus ordonnée, ainsi qu'un désalignement mineur avec la direction d'écoulement, sont atteints lorsque le milieu est composé de particules caractérisées par un grand rapport d'aspect. Enfin, nous discutons la corrélation qui existe entre la vitesse angulaire et l'orientation des particules.

Abstract :

In this work, we analyze the behavior of granular media made of shape anisotropic particles in heterogeneous and confined flow conditions. The experiments are carried out in an annular shear cell with a rotating bottom wall and an upper wall allowing vertical confinement of the medium. The granular samples are composed of spherocylinders with three different aspect ratios. The flow kinematics as well as a statistic of the particles orientation are derived by means of a particle tracking algorithm. Firstly, we observe a negligible influence of the particles shape on translational velocity profiles. Conversely, the angular velocity is significantly affected by the shape of the particles. In particular, we show that the proneness of a particle to rotate decreases systematically with its elongation. We then turn our attention to the orientation of the particles. In flow conditions, the particles undergo a collective reorientation and arrange themselves, on average, with a certain angle with respect to the direction of the flow. when the medium is composed of particles characterized by a higher aspect ratio a more ordered phase, as well as a minor misalignment with the direction of flow, are achieved. Finally, we discuss the correlation that exists between the angular velocity and the orientation of the particles.

Mots clés : Écoulements Granulaires, Rotations des Particules, Particules Allongées, Ordre Orientationnel

1 Introduction

Les milieux granulaires sont souvent composés de particules de forme anisotrope, pourtant la majorité des expériences et des études théoriques se sont concentrées sur des particules sphériques. Récemment, plusieurs travaux ont mis en lumière l'influence remarquable que la forme des particules a sur le comportement des milieux granulaires [1, 2, 3, 4, 5, 6]. En fait, cela peut introduire des phénomènes macroscopiques qualitativement nouveaux par rapport au cas de grains sphériques. Un bon aperçu du comportement des milieux granulaires composés de particules de forme anisotrope est présenté par Börzsönyi et Stannarius [7].

Dans ce travail, nous discutons des résultats expérimentaux concernant le comportement d'un milieu granulaire composé de particules de forme anisotrope en conditions d'écoulement. D'abord nous présentons le dispositif expérimental et la méthodologie utilisée. Ensuite, nous analysons la cinématique de l'écoulement avec une attention particulière à la rotation de grains. Enfin, nous étudions le phénomène de réorientation collective des particules et nous discutons la corrélation qui existe entre la vitesse angulaire et l'orientation des particules.

2 Méthodologie

Les expériences ont été menées dans une cellule de cisaillement annulaire [8, 9]. La cellule est composée de deux cylindres coaxiaux avec un rayon externe de $R_e = 100$ mm et $R_i = 45$ mm respectivement, pour une épaisseur de la zone annulaire intérieure de 50 mm. Les parois horizontales supérieure et inférieure ont une surface rugueuse caractérisée par un maillage triangulaire d'hémisphères (diamètre $b = 6$ mm et espacement $2b$). La paroi inférieure est fixée sur un plateau tournant entraîné par un moteur pas-à-pas, tandis que la paroi supérieure est reliée à un support empêchant la rotation, mais laissant libre le déplacement en direction axiale. En outre, cette dernière permet l'application d'une pression verticale sur le milieu granulaire. Trois échantillons composés de sphérocyindres en acide polylactique (PLA) avec un diamètre $d = 6$ mm et un rapport d'aspect, *i.e.* $AR = d/L$, variable (2, 2.5, 3) ont été utilisés. Les sphérocyindres ont été réalisés par impression 3D. La masse totale de chaque échantillon (M_g) est égale à 0.93 kg, ce qui correspond à une hauteur d'écoulement de 72 mm ($\sim 12d$). Un certain nombre de particules (5% en masse) a été imprimé avec une couleur différente (rouge) afin d'utiliser ces particules comme traceurs dans l'algorithme de "particle tracking". Dans un précédent travail, Artoni et al. [8] ont montré que la forme des profils cinématiques ne dépend pas de la vitesse de rotation de la paroi. En outre, l'alignement préférentiel des particules que l'on obtient suite à un cisaillement continu du milieu semble être indépendant du taux de cisaillement [10, 4]. Donc, la même vitesse de rotation de la paroi inférieure ($\Omega = 5.86$ r.p.m.) a été utilisée dans toutes les expériences présentées dans ce travail. Enfin, trois différents niveaux de confinement vertical ont été considérés en plaçant une masse égale à $M_w = 0.67, 1.94$ et 3.64 kg sur la paroi supérieure. Le niveau de confinement vertical est indiqué par le paramètre sans dimension $M^* = M_w/M_g$ dans la suite. Les combinaisons expérimentales sont résumées dans la Table 1.

Dans les expériences, nous filmons l'écoulement avec une caméra CMOS industrielle (Basler acA2440-75uc). La zone de contrôle est représentée par un rectangle rouge dans la Fig. 1a. Un algorithme de

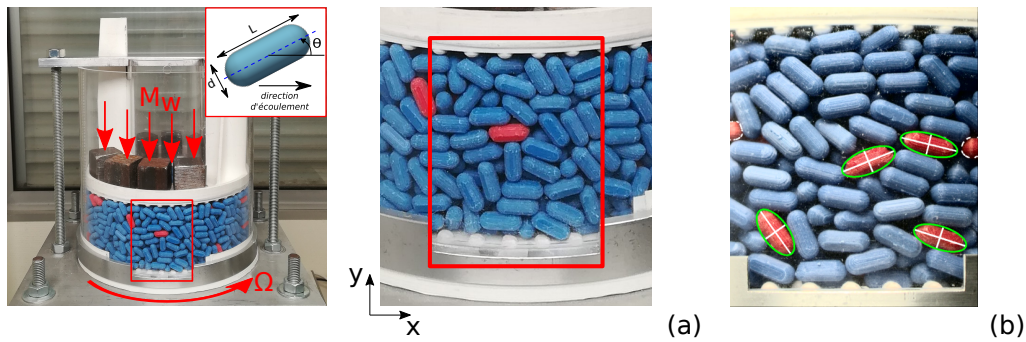


FIGURE 1 – (a) Dispositif expérimental et géométrie d'un sphérocyindre. La zone de contrôle utilisée dans l'analyse est représentée par un rectangle rouge. (b) Exemple d'application de l'algorithme de "particle tracking" ($AR = 2.5$).

AR [-]	M_g [kg]	M_w [kg]	M^* [-]	Ω [r.p.m.]
2.0	0.93	0.67	0.7	5.86
2.0	0.93	1.94	2.1	5.86
2.0	0.93	3.64	3.9	5.86
2.5	0.93	0.67	0.7	5.86
2.5	0.93	1.94	2.1	5.86
2.5	0.93	3.64	3.9	5.86
3.0	0.93	0.67	0.7	5.86
3.0	0.93	1.94	2.1	5.86
3.0	0.93	3.64	3.9	5.86

TABLE 1 – Différentes combinaisons expérimentales.

"particle tracking" a été utilisé pour obtenir la cinématique d'écoulement ainsi que l'orientation des particules. Premièrement, un filtre sur la couleur est appliqué pour identifier les particules traceurs. Deuxièmement l'algorithme recherche l'ellipse qui approxime le mieux la particule (par la méthode des moindres carrés) et en déduit l'angle θ entre le grand axe de l'ellipse et l'horizontale, i.e. la direction d'écoulement, qui détermine l'orientation de la particule. Un exemple d'application de l'algorithme est montré dans la Figure 1b.

Il faut noter que la technique utilisée permet de mesurer seulement les déplacements et rotations des particules proches de la paroi ; le comportement observé pourrait donc ne pas être représentatif des particules loin de la paroi. Cependant, l'épaisseur transverse de l'écoulement étant relativement réduite ($\sim 8d$), nous pouvons raisonnablement supposer que les gradients transversaux sont faibles. Par conséquent, le comportement des particules dans la zone intérieure de l'écoulement ne devrait pas être très différent de celui observé à la paroi. Des résultats préliminaires d'une campagne de simulations numériques discrètes semblent confirmer cela. Compte tenu de l'hétérogénéité du champ de vitesse dans l'écoulement, deux différentes fréquences d'acquisition ont été utilisées (1fps, 10fps). La comparaison entre différentes expériences a mis en évidence qu'elles étaient bien répétables.

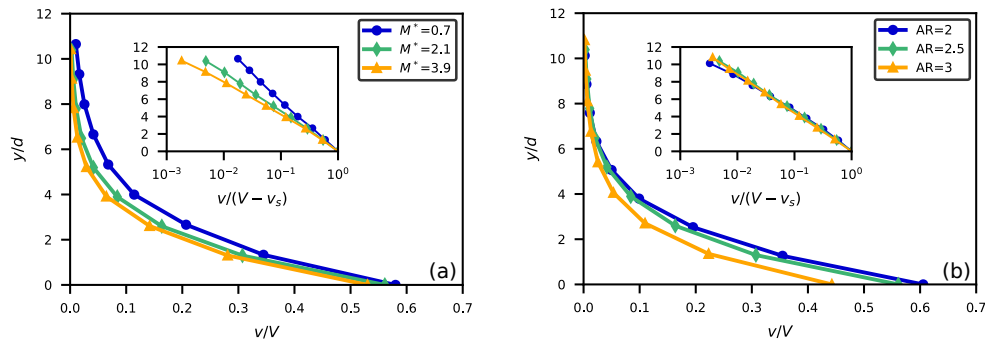


FIGURE 2 – Profils de vitesse translationnelle : (a) effet de la charge appliquée ($AR = 2.5$), (b) effet du rapport d’aspect des particules ($M^* = 2.1$). Les barres d’erreur sont inférieures à la taille des symboles. Les valeurs sont normalisées par rapport à la vitesse azimutale des aspérités adjacentes à la paroi latérale $V = \Omega(R_e - d/2)$. Inserts : Profils de vitesse normalisés par rapport à la vitesse à la base de l’écoulement $V - v_s$.

3 Résultats

3.1 Profils cinématiques

Dans la suite, nous présentons l’effet de l’allongement des particules et de la charge verticale sur la cinématique d’écoulement. Les deux effets s’avèrent indépendants, il est donc possible de les traiter de manière séparé en faisant référence au cas intermédiaire, *i.e.* $AR = 2.5$, $M^* = 2.1$.

Les profils de vitesse montrent une décroissance exponentielle avec la hauteur d’écoulement et sont caractérisés par une localisation du cisaillement au niveau de la paroi inférieure. L’épaisseur de la bande de cisaillement diminue avec l’augmentation de la charge appliquée (Fig. 2a) en analogie avec le cas de particules sphériques [8]. L’anisotropie de forme des particules n’affecte que de manière mineure le profil de vitesse. Nous observons une vitesse de glissement plus importante à la paroi inférieure dès lors que l’on augmente l’allongement des particules (voir Figure 2a). Cependant, une fois la vitesse remise à l’échelle par la vitesse à la base de l’écoulement, *i.e.* $V - v_s$, les profils obtenus à différents AR se regroupent sur une même courbe (voir insert dans la Figure 2b). Cela implique que l’écoulement est caractérisé par la même hétérogénéité indépendamment du rapport d’aspect utilisé.

Les profils de vitesse angulaire sont représentés dans la Figure 3. Nous observons que la charge verticale appliquée a un effet négligeable sur la rotation des particules (voir Figure 3a). Par contre, l’anisotropie géométrique des particules a un fort impact sur leur rotation. Dans la Figure 3b nous pouvons observer une réduction significative de la vitesse angulaire des grains dès lors que l’on augmente leur rapport d’aspect. Étant donné que le taux de cisaillement est à peu près le même pour les rapports d’aspect considérés ($10^{-2} \leq \dot{\gamma} \leq 1$), cela indique une augmentation de la frustration de la rotation des particules avec l’augmentation de leur élongation.

3.2 Orientation des particules

Afin d’étudier l’alignement des particules induit par le cisaillement du milieu, leur distribution en orientation est envisagée dans un premier temps. Nous rappelons que l’orientation d’une particule est ici représentée par θ , l’angle entre son grand axe et la direction principale d’écoulement (voir Figure 1a). La Figure 4a montre la distribution des orientations des particules en fonction des différents rapports

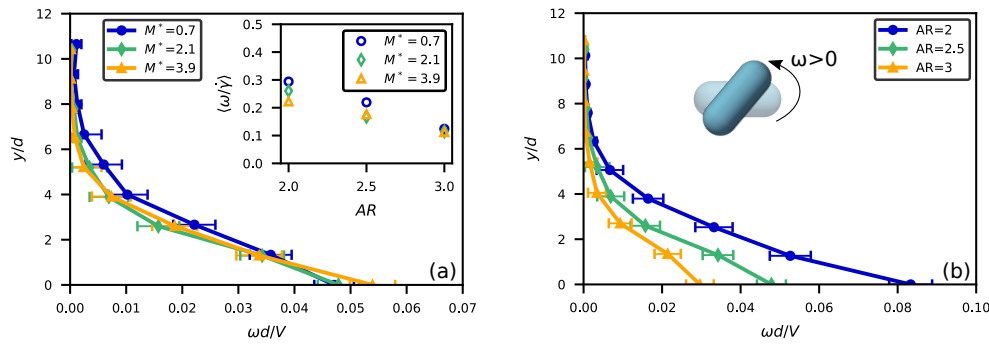


FIGURE 3 – Profils de vitesse angulaire : (a) effet de la charge appliquée ($AR = 2.5$), (b) effet du rapport d'aspect des particules ($M^* = 2.1$). Insert : valeur moyenne de la vitesse angulaire normalisée par le taux de cisaillement local.

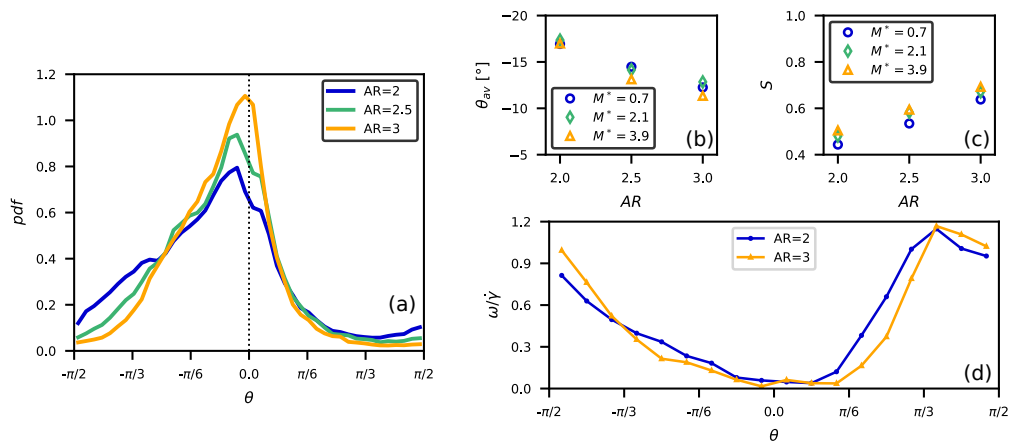


FIGURE 4 – (a) Distribution des orientations des particules pour différents rapports d'aspect. (b) Orientation moyenne des particules θ_{av} et (c) paramètre d'ordre S en fonction du rapport d'aspect des particules. (d) Vitesse angulaire normalisée en fonction de l'orientation locale des particules pour les cas $AR = 2$ et $AR = 3$ avec une charge verticale $M^* = 2.1$.

d'aspect. Nous observons que la distribution de θ est fortement anisotrope, et que les particules ont tendance à s'orienter en moyenne avec un certain angle par rapport à la direction d'écoulement. Dans la Figure 4b nous présentons les valeurs d'orientation moyenne θ_{av} (moyenne circulaire) pour les différentes expériences menées dans ce travail. Nous pouvons observer que le désalignement par rapport à la direction d'écoulement diminue lorsque les particules sont plus allongées et que ce dernier est presque indépendant du confinement vertical appliqué. En outre, nous remarquons que la distribution de θ devient plus étroite avec une augmentation de AR , suggérant ainsi que l'alignement induit par le cisaillement du milieu devient plus important lorsque le milieu est composé des particules caractérisées par le plus grand rapport d'aspect. Pour mieux comprendre cette réorientation collective des grains lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement continu, nous utilisons le paramètre $S = \langle 2 \cos^2(\theta - \theta_{av}) - 1 \rangle$. Cela permet de quantifier l'ordre en orientation dans le milieu. Dans un système parfaitement ordonné, le paramètre d'ordre S est égal à 1, tandis que pour un système orienté de manière aléatoire, le paramètre S est égal à 0. Dans la Figure 4c nous présentons le paramètre d'ordre S en fonction du rapport d'aspect des grains. Nous observons une augmentation systématique du paramètre S avec le rapport d'aspect des particules. Cette tendance à atteindre un ordre orientationnel supérieur, dans les systèmes composés par

des particules plus allongées, est cohérente avec les observations présentées dans de précédents travaux [10, 4, 15, 5, 16, 6].

Enfin, nous étudions la corrélation entre la vitesse angulaire et l'orientation locale des particules. Pour cela, nous moyennons la vitesse angulaire, une fois remise à l'échelle avec le taux de cisaillement local, en répartissant les données en classes caractérisées par le même intervalle de θ . Les cas caractérisés par un rapport d'aspect $AR = 2$ et $AR = 3$ et une charge verticale $M^* = 2.1$ sont comparés dans la Figure 4d. À l'inverse des particules isotropes, pour lesquelles la vitesse angulaire est indépendante de l'orientation, nous observons qu'en moyenne ces deux sont fortement corrélées. Les particules considérablement désalignées par rapport à l'orientation moyenne ont tendance à tourner plus rapidement, tandis que celles avec une orientation proche de θ_{av} tournent plus lentement. En outre, nous observons que la distribution en orientation de la vitesse angulaire devient plus anisotrope dès lors que l'on augmente l'anisotropie de forme des particules, soulignant ainsi une corrélation majeure entre orientation et rotation. Au contraire, l'effet d'une variation de la charge verticale s'avère négligeable.

4 Conclusions

Dans ce travail, nous avons discuté des expériences d'écoulement d'un milieu granulaire composé de grains allongés dans une configuration de cisaillement annulaire. Cette configuration nous a permis d'analyser l'effet conjoint du confinement vertical et de l'hétérogénéité du cisaillement sur la dynamique de rotation et le phénomène de réorientation collective des particules. Nous avons observé que la vitesse translationnelle est affectée seulement de manière minoritaire par l'allongement des particules, tandis qu'un effet significatif est observé au niveau de la vitesse angulaire. Nous avons remarqué une frustration de la rotation des grains ; cela devient de plus en plus important lorsque l'on augmente l'anisotropie des particules. Deuxièmement, nous avons observé une tendance des particules à s'aligner préférentiellement avec un certain angle par rapport à la direction d'écoulement. Ce désalignement diminue et une phase plus ordonnée est atteinte lorsque le milieu est composé de particules caractérisées par le plus grand rapport d'aspect. Enfin, nous avons constaté une forte corrélation entre la vitesse angulaire et l'orientation des particules. La vitesse angulaire est en moyenne plus grande lorsqu'une particule est fortement désalignée avec l'orientation préférentielle, tandis qu'elle tend à s'annuler pour des orientations proches de cette dernière. En outre, une corrélation plus marquée est observée pour des grains présentant le plus grand rapport d'aspect. La corrélation entre les fluctuations de vitesse angulaire et l'orientation locale des particules semble donc jouer un rôle crucial sur le comportement des écoulements granulaires constitués de particules allongées. Cette corrélation est probablement à la base du phénomène de réorientation collective des grains observée dans ces systèmes discrets.

Références

- [1] A. Donev, I. Cisse D. Sachs E. A. Variano et al., Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids Science, 303(5660), 990–993 (2004)
- [2] M. Mailman, C.F. Schreck, C.S. O'Hern, B. Chakraborty, Jamming in Systems Composed of Frictionless Ellipse-Shaped Particles, Physical Review Letters, 102(25), 255501 (2009)
- [3] R.C. Hidalgo, I. Zuriguel, D. Maza, I. Pagonabarraga, Role of Particle Shape on the Stress Propagation in Granular Packings, Physical Review Letters, 103(11), 118001 (2009)

- [4] T. Börzsönyi, B. Szabó, G. Törös, S. Wegner et al., *Physical Review Letters*, 108(22), 228302 (2012)
- [5] M. Trulsson, *Rheology and shear jamming of frictional ellipses*, *Journal of Fluid Mechanics*, 849, 718–740 (2018)
- [6] A. Pol, R. Artoni, P. Richard, P.R.N da Conceição, F. Gabrieli, *Kinematics and shear-induced alignment in confined granular flows of elongated particles*, *New Journal of Physics*, (accepté)
- [7] T. Börzsönyi, R. Stannarius, *Granular materials composed of shape-anisotropic grains*, *Soft Matter*, 9(31), 7401–7418 (2013)
- [8] R. Artoni, A. Soligo, J. M. Paul, P. Richard, *Shear localization and wall friction in confined dense granular flows*, *Journal of Fluid Mechanics*, 849, 395–418 (2018)
- [9] M. Tirapelle, A. C. Santomaso, P. Richard, R. Artoni, *Experimental investigation and numerical modelling of density-driven segregation in an annular shear cell*, *Advanced Powder Technology*, 32(5), 1305-1317 (2021)
- [10] T. Börzsönyi, B. Szabó, S. Wegner, K. Harth, et al. *Shear-induced alignment and dynamics of elongated granular particles*, *Physical Review E*, 86(5), 051304 (2012)
- [11] C.K.K. Lun, A.A. Bent, *Numerical simulation of inelastic frictional spheres in simple shear flow*, *Journal of Fluid Mechanics*, 258, 335–353 (1994)
- [12] F. da Cruz, S. Emam, M. Prochnow, J.N. Roux, F. Chevoir, *Rheophysics of dense granular materials : Discrete simulation of plane shear flows*, *Phys. Rev. E* 72(2), 021309 (2005)
- [13] G. Koval, J.N. Roux, A. Corfdir, F. Chevoir, *Annular shear of cohesionless granular materials : From the inertial to quasistatic regime*, *Physical Review E*, 79(2), 021306 (2009)
- [14] R. Artoni, P. Richard, *Coarse graining for granular materials : micro-polar balances*, *Acta Mechanica*, 230, 3055–3069 (2019)
- [15] D.B. Nagy, F. Claudin, T. Börzsönyi, E. Somfai, *Rheology of dense granular flows for elongated particles* *Physical Review E*, 96(6), 062903 (2017)
- [16] T. Marschall, Y.E. Keta, P. Olsson, S. Teitel, *Orientational Ordering in Athermally Sheared, Aspherical, Frictionless Particles*, *Physical Review Letters*, 122(18), 188002 (2019)