

**Proposition de thèse :** Fracture de fibres modèles dans un écoulement granulaire

**Encadrants :** Riccardo ARTONI (MAST/GPEM,) [riccardo.artoni@univ-eiffel.fr](mailto:riccardo.artoni@univ-eiffel.fr) ; Patrick RICHARD (MAST/GPEM) [patrick.richard@univ-eiffel.fr](mailto:patrick.richard@univ-eiffel.fr)

**Mots clés :** matériaux granulaires, fibres, fracture, écoulement

**Contexte :** Les matériaux granulaires ont de nombreuses spécificités qui compliquent leur étude et qui expliquent que, à ce jour, il n'existe pas d'équations constitutives permettant de décrire l'ensemble des comportements observés. Il s'en suit que les procédés industriels associés aux matériaux granulaires sont souvent rudimentaires, fondés sur des règles empiriques peu optimisées. Cela est encore plus vrai lorsque la forme des particules est complexe, comme dans le cas des fibres rigides, que l'on trouve dans une myriade d'applications allant de l'industrie alimentaire à l'industrie pharmaceutique et, dans le génie civil, du béton à la construction en terre crue.

Parmi les problématiques qui constituent un véritable défi pour la modélisation des écoulements granulaires, le changement de taille des grains se démarque pour sa complexité [1]. Or, il est présent dans de nombreuses opérations industrielles qui concernent une large gamme de domaines: (1) les procédés de concassage/broyage, où la réduction de taille est recherchée (mais peu contrôlée et sujette à des pertes importante en ressource et énergie) , (2) la granulation où des mécanismes d'agglomération et fracture contribuent à l'évolution de la taille du granule, (3) les opérations de mélange/transport/stockage des produits granulaires, où l'usure des grains (attrition) avec formation de fines est toujours présente et peut représenter un danger pour le contrôle de procédé [2]. Mais cela ne se limite pas aux applications industrielles. Pour donner un exemple, la fracture des grains est présente dans les écoulements géophysiques (glissements de terrain, coulées), et influence certainement la rhéologie et les risques annexes [3]. Pour aller plus loin, des phénomènes de fracture et d'agglomération ont été aussi avancés pour expliquer la distribution de taille des particules formant les anneaux de Saturne [4]. L'évolution de la taille des grains dans différents procédés est souvent modélisée par des approches statistiques de type « bilan de population » [5]. Ces modèles décrivent l'évolution de la distribution de la taille (particle size distribution, PSD) et de la composition des particules et nécessitent plusieurs choix de modélisation du processus de fracture. Il faut noter que, dans les écoulements granulaires polydispersés, des phénomènes de ségrégation par taille peuvent avoir lieu : ces phénomènes peuvent également influencer la rhéologie locale [6,7], et augmentent donc la complexité du problème via le couplage des phénomènes en jeu.

**Sujet :** L'objectif de cette thèse est d'étudier le couplage entre fracture et écoulement pour une classe particulière de matériaux granulaires, des fibres. La thèse comportera trois volets : expérimental, numérique et de modélisation.

Du point de vue expérimental, des fibres modèles seront préparées au laboratoire par soudage par solvant de billes en plastique. La résistance des joints sera testée par différentes méthodes (tests d'impact, presse). Ensuite les fibres seront placées dans une cellule de cisaillement annulaire [8] dans laquelle les grains sont cisailés par la rotation de la paroi inférieure et comprimés par une charge sur la paroi supérieure. Dans cette cellule, les profils d'écoulement seront calculés par vélocimétrie par images de particules sur des vidéos enregistrées par une caméra haute vitesse. La fracture des grains, ainsi que l'éventuelle ségrégation par taille, seront évalués à différents temps d'écoulement, par analyse d'image et par analyse directe.

Du point de vue numérique, des simulations avec un code « éléments discrets » (DEM), seront menées de manière à caractériser - à l'échelle de la particule - l'écoulement confiné de grains allongés [9] et son couplage avec la fracture. Ces simulations pourront prendre en compte des modèles de contact développés au laboratoire [10] et pourront être analysés grâce à des méthodes de moyenne prenant en compte les effets micropolaires [11, 12].

Les résultats expérimentaux et numériques permettront de construire un modèle continu composé de lois constitutives pour la rhéologie et pour la fracture, intégrés dans des équations de conservation de la quantité de mouvement et des bilans de population pour la taille des grains. Les résultats seront également comparés à des calculs effectués avec une théorie cinétique simplifiée prenant en compte la fracture des grains, établie en collaboration avec les professeurs Michele Larcher (Univ Bolzano Italie) et Jim Jenkins (Cornell, US).

## Références

- [1] A. D. Salman, M. Ghadiri, and M. Hounslow (2007). Particle breakage, volume 12. Elsevier.
- [2] J. Moreno Juez et al. (2016). Construction and Building Materials, 116:299-309.
- [3] T. Davies and M. McSaveney (2009). Engineering Geology, 109(1):67-79. ; V. J. Langlois et al. (2015). Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 120(9):1866-1880.
- [4] N. Brilliantov et al. (2015). Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(31): 9536-9541.
- [5] D. Ramkrishna (2000). Population balances: Theory and applications to particulate systems in engineering. Academic press.

- [6] Rognon, P. G., Roux, J. N., Naaïm, M., & Chevoir, F. (2007). Dense flows of bidisperse assemblies of disks down an inclined plane. *Physics of Fluids*, 19(5), 058101.
- [7] Gray, J. M. N. T. (2018). Particle segregation in dense granular flows. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 50, 407-433.
- [8] Artoni, R., Soligo, A., Paul, J. M., & Richard, P. (2018). Shear localization and wall friction in confined dense granular flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 849, 395-418.
- [9] Pol, A., Artoni, R., Richard, P., da Conceição, P. R. N., & Gabrieli, F. (2022). Kinematics and shear-induced alignment in confined granular flows of elongated particles. *New Journal of Physics*, 24(7), 073018.
- [10] Neveu A., Artoni R., Richard P. and Descantes Y. (2016) Fracture of granular materials composed of arbitrary grain shapes: A new cohesive interaction model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 95, 308-319.
- [11] Artoni R. and Richard P. (2015) Average balance equations, scale dependence, and energy cascade for granular materials, *Phys. Rev. E* 91, 032202
- [12] Artoni R. and Richard P. (2019) Coarse graining for granular materials: micro-polar balances, *Acta mechanica*, 230, 3055-3069