

Alain Barrat

TRAVAUX DE RECHERCHE

1 Compaction des milieux granulaires

La physique de la compaction des milieux granulaires constitue un champ de la physique hors d'équilibre qui pose de nombreuses questions aussi bien théoriques qu'expérimentales.

De par les échelles d'énergie mises en jeu, les milieux granulaires peuvent être considérés comme à température nulle. Ceci implique que l'on doit leur apporter de l'énergie afin de leur permettre d'explorer l'espace des phases, et que toute dynamique s'étudie comme la réponse à une perturbation extérieure. La dynamique des milieux granulaires dépend en général de nombreux paramètres, dont en particulier l'histoire du système, ce qui rend délicate leur étude.

De nombreux modèles ont été proposés pour reproduire la riche phénoménologie mise en évidence par la série d'expériences du groupe de Chicago. De nouvelles expériences ont de plus été réalisées récemment, par un groupe de Rennes (D. Bideau et P. Philippe) ainsi que par G. D'Anna à Lausanne.

Approche thermodynamique des milieux granulaires denses

Les milieux granulaires sont toujours hors d'équilibre, et les outils habituels de la thermodynamique ne peuvent leur être appliqués; il est pourtant clair que, comme pour d'autres systèmes comportant de nombreux degrés de liberté, une approche thermodynamique permettrait une compréhension bien plus profonde du problème. Il est très important dans ce contexte de comprendre quels outils de type thermodynamique peuvent être utilisés et comment développer des descriptions basées sur un petit nombre de paramètres. Il y a quelques années, S.F. Edwards et ses collaborateurs ont fait une proposition pour traiter les granulaires denses en proposant un substitut à l'ensemble microcanonique: les quantités macroscopiques doivent être obtenues par une moyenne sur toutes les configurations bloquées (c'est-à-dire dans lesquelles tous les grains sont incapables de bouger spontanément) de volume, énergie etc... donnés. L'hypothèse forte est ici que toutes les configurations bloquées sont considérées comme équivalentes et ont le même poids dans la mesure ainsi définie.

Cette approche a ses racines dans la physique de la transition vitreuse, et l'on sait qu'elle est valide dans certains modèles de champ moyen pour les verres.

Lors d'études réalisées avec J. Kurchan, V. Loreto et M. Sellitto, nous avons proposé une méthode pour construire et échantillonner de façon systématique la "mesure d'Edwards" (l'ensemble des configurations bloquées du système), et montré que la prédiction de cette mesure pour un certain nombre d'observables coïncide avec les résultats de la dynamique de compaction à temps longs, dans le cas d'une compaction où le système reste homogène. Avec V. Colizza, étudiante à Rome, et V. Loreto, nous avons continué à tester la validité de la mesure d'Edwards dans des cas plus réalistes, où l'implémentation de la compaction sous l'effet de la gravité implique une hétérogénéité du système dans la direction verticale. Nous avons en particulier souligné que l'étude d'observables corrélées à la direction privilégiée peut induire des observations erronées, tandis que des mesures de diffusion et mobilité horizontales montrent la validité de la mesure d'Edwards. Cette approche a de plus permis de proposer des tests expérimentaux pour la validité de ces concepts.

Références: V. Colizza, A. Barrat and V. Loreto, *Definition of temperature in dense granular media*, Phys. Rev. E **65**, 050301 (2002). A. Barrat, V. Colizza and V. Loreto, *Fluctuation-Dissipation Ratio for Compacting Granular Media* Phys. Rev. E **66**, 011310 (2002).

2 Gaz granulaires

Les granulaires fortement vibrés sont pour leur part étudiés comme des **gaz granulaires**. De nombreuses expériences sont menées afin d'explorer la riche phénoménologie de ces systèmes, les instabilités, les distributions de vitesse, etc...

D'un point de vue théorique, le modèle le plus couramment utilisé est celui des sphères dures inélastiques car, malgré la simplicité de sa définition, il permet de reproduire de nombreux phénomènes expérimentaux observés dans des systèmes granulaires fortement vibrés. Ce modèle considère des sphères dures de même masse qui évoluent en dimension d avec des collisions binaires, conservant la quantité de mouvement mais inélastiques: à chaque collision, une fraction $(1 - \alpha)$ de la composante normale de la vitesse relative est dissipée (α est appelé coefficient de restitution), et donc de l'énergie est perdue. Usuellement α est constant; la limite $\alpha = 1$ correspond à des sphères parfaitement élastiques.

2.1 Gaz inélastique en dimension 1

En collaboration avec T. Biben (Grenoble), Z. Rácz, en visite au LPT, E. Trizac et F. van Wijland, nous avons étudié, avec des outils aussi bien analytiques que numériques, le cas d'un gaz granulaire en dimension 1, avec ou sans injection d'énergie. Nous avons caractérisé les distributions de vitesse, en particulier dans la limite de quasi-élasticité, à partir de l'équation de Boltzmann qui néglige les corrélations de vitesse, et aussi par des simulations de dynamique moléculaire qui intègrent les équations exactes du mouvement.

Référence: A. Barrat, T. Biben, Z. Rácz, E. Trizac and F. van Wijland, *On the velocity distributions of the one-dimensional inelastic gas*, J. Phys. A **35**, 463 (2002).

2.2 Modèle à coefficient de restitution aléatoire

De nombreuses expériences étudient les lits granulaires vibrés, et en particulier les distributions de vitesse horizontale des particules, et leurs déviations par rapport à une gaussienne. Alors que de nombreuses études théoriques ont porté sur ces déviations dans le cas de systèmes sans forçage, une injection d'énergie est nécessaire lors des expériences. Cette injection a été modélisée par une force aléatoire agissant sur les particules à intervalles réguliers, et en gardant le modèle de sphères dures inélastiques à coefficient de restitution constant. Cependant, cette injection se transmet en fait de particule à particule lors des collisions: une collision en trois dimensions peut en fait se traduire par un gain d'énergie dans le plan horizontal (même si globalement il y a perte d'énergie).

En collaboration avec E. Trizac, nous avons donc proposé un modèle de sphères dures inélastiques pour lesquelles le coefficient de restitution, qui exprime la fraction d'énergie des particules perdue à chaque collision, n'est pas constant comme dans les modèles habituels, mais aléatoire, et en particulier peut prendre des valeurs plus grandes que 1, ce qui correspond à un gain d'énergie lors d'une collision.

Une étude analytique et numérique de ce modèle a permis de montrer qu'il pouvait prédire diverses formes de distributions de vitesse, en fonction de la distribution de probabilité des coefficients de restitution. En particulier des distributions en accord avec des résultats expérimentaux peuvent être obtenues.

Pour aller plus loin, nous avons bénéficié d'une interaction fructueuse avec N. Menon (Massachusetts) qui réalise des expériences sur des gaz de sphères dures (billes d'acier, de verre...) en dimension 2. L'étude statistique de la projection horizontale de collisions nous a permis de raffiner notre modèle, en introduisant des corrélations entre le coefficient de restitution effectif et la vitesse d'impact des particules, et de montrer son adéquation avec la réalité expérimentale.

Références: A. Barrat, E. Trizac, J.N. Fuchs, *Heated granular fluids: the random restitution coefficient approach*, Eur. Phys. J. E **5**, 161 (2001). A. Barrat, E. Trizac, *Random inelasticity and velocity fluctuations in a driven granular gas*, soumis.

2.3 Mélanges binaires

Des études récentes, expérimentales et théoriques, ont montré que, dans un gaz granulaire formé d'un mélange de deux types de sphères inélastiques, et mis dans un régime stationnaire par un forçage extérieur, l'équipartition de l'énergie n'est pas réalisée, contrairement au cas élastique.

Nous avons étudié analytiquement et numériquement ce phénomène dans le cas d'un modèle idéal où le système reste homogène et où l'énergie est injectée de façon également homogène, afin d'étudier l'influence des nombreux paramètres (qui ne peuvent pas être changés aussi facilement dans les expériences).

Référence: A. Barrat, E. Trizac, *Lack of energy equipartition in homogeneous heated binary granular mixtures*, Gran. Matt. **4**, 57 (2002).