

Alain Barrat

1 TRAVAUX DE RECHERCHE

1.1 Milieux granulaires denses

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.

L'approche de type thermodynamique des milieux granulaires denses, dont nous avons démontré la validité dans certains cas (collaboration passée avec V. Colizza, J. Kurchan, V. Loreto, M. Sellitto), a besoin de tests expérimentaux. Dans cette optique, des expériences ont été réalisées dans le groupe de G. D'Anna à Lausanne, en collaboration également avec V. Loreto à Rome; en utilisant comme système de mesure un pendule de torsion immergé dans un milieu granulaire dense sous vibration (système athermal), nous avons pu mettre en évidence pour la première fois que le granulaire satisfait une relation de fluctuation-dissipation, au moins de manière approximative: l'oscillateur se comporte comme un oscillateur plongé dans un bain thermique et subissant un mouvement Brownien, au moins en première approximation et dans la zone de fréquences explorée.

Référence: G. D'Anna, P. Mayor, A. Barrat, V. Loreto and F. Nori, *Observing Brownian motion in vibration-fluidized granular matter*, Nature **424** (2003) 909.

1.2 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.

Mon activité a concerné différents axes d'études de ce modèle.

- En collaboration avec E. Trizac, nous avons réalisé des simulations dynamiques de gaz granulaires vibrés avec une injection réaliste d'énergie par des murs vibrants, afin de se rapprocher de la situation expérimentale. Cette approche complète les études précédentes qui se concentraient plutôt sur la théorie cinétique. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres (densité, inélasticité des billes...) sur les profils de densité, d'énergie cinétique, ainsi que sur les distributions de vitesse. Nous avons également réalisé des simulations dans le cas de mélanges binaires, ce qui nous a permis d'étudier l'influence de divers paramètres sur la non-équipartition de l'énergie: les tendances observées expérimentalement sont bien

reproduites (même pour des détails fins), ce qui permet de valider les simulations et de faire varier les paramètres plus facilement que dans des expériences.

- Toujours avec E. Trizac, nous avons réalisé des simulations de l'expérience du "Démon de Maxwell": dans une bote vibrée, séparée en deux compartiments communicants, si le nombre de particules inélastiques est assez grand, un des compartiments se peuple spontanément plus que l'autre (malgré le nom "Démon de Maxwell", ceci ne viole aucun principe de la thermodynamique puisqu'il s'agit d'un système hors d'équilibre); nous avons étudié cette brisure spontanée de symétrie, en définissant un paramètre d'ordre et en montrant d'une part que les équations hydrodynamiques restent valides, et d'autre part que de grandes fluctuations apparaissent près de la transition; ces grandes fluctuations pourraient être étudiées expérimentalement.
- En collaboration avec V. Loreto et A. Puglisi de Rome, nous avons étudié la validité de relations du type fluctuation-dissipation dans les gaz granulaires, qui sont dans des états stationnaires hors d'équilibre. Une première étude avait montré que dans un certain modèle, une telle relation existait, avec à la place de la température la température granulaire (c'est-à-dire l'énergie cinétique moyenne des grains). Ce résultat n'est pas trivial car la "température granulaire" est ainsi nommée par analogie avec les gaz à l'équilibre et n'a pas de statut thermodynamique (en particulier, l'équipartition de l'énergie n'est pas réalisée). Il était donc important de vérifier si ce résultat était valide également dans d'autres conditions, en particulier dans des mélanges, pour lesquels l'équipartition est violée et les deux composants ne sont donc pas à la même "température" granulaire. Nous avons ainsi montré que chaque composant du mélange suivait une relation fluctuation-dissipation avec sa propre température granulaire, tandis qu'aucune telle relation n'est valide pour le système dans son ensemble.
- Avec U.M. Bettolo Marconi, D. Paolotti et A. Puglisi nous avons étudié l'apparition de la convection dans des gaz granulaires mono- et bi-disperses, par des simulations extensives de dynamique moléculaire. Nous avons ainsi d'une part vérifié des prédictions basées sur une approche hydrodynamique, et d'autre part montré l'influence cruciale que peut avoir une faible densité d'impuretés sur le seuil d'apparition de la convection.

Références: A. Barrat, E. Trizac, *Molecular dynamics simulations of vibrated granular gases*. Phys. Rev. E **66** (2002) 051303. A. Barrat, E. Trizac, *A molecular dynamics Maxwell Demon experiment for granular mixtures*, Mol. Phys. **101** (2003) 1713. A. Barrat, V. Loreto and A. Puglisi, *Temperature probes in binary granular gases*, Physica A **334** (2004) 513. D. Paolotti, A. Barrat, U. Marini Bettolo Marconi, A. Puglisi, *Thermal convection in mono-disperse and bi-disperse granular gases: A simulation study*, Phys. Rev. E **69** (2004) 061304.

1.3 Réseaux

L'activité concernant l'étude des réseaux pondérés s'est développée récemment au sein du groupe de physique statistique. En collaboration avec M. Barthélemy du CEA, I. Alvarez-Hamelin, L. Dall'Asta et A. Vespignani du LPT, et R. Pastor-Satorras (Barcelone), elle s'est concentrée sur les axes suivants:

- Réseaux complexes pondérés

Nous avons réalisé une étude phénoménologique de réseaux rels pondérés, pour aller au-delà de la description usuelle de nature uniquement topologique. Ceci nous a menés à proposer

de nouveaux outils pour quantifier les corrélations entre la topologie et les intensités des liens. Nous avons également proposé et étudié (avec des outils analytiques et numériques) un modèle de réseaux croissants pondérés, alliant l'évolution de la topologie à celle du trafic défini sur le réseau. Ce modèle permet par un mécanisme simple de rendre compte de nombreux aspects rencontrés dans les réseaux réels.

- Par l'étude de la dynamique de modèles d'épidémies sur des réseaux hétérogènes, nous avons mis en évidence la divergence de la vitesse initiale de propagation pour des réseaux très hétérogènes; cette étude nous a également permis de révéler la structure de la propagation de l'épidémie, qui se fait par contamination des "hubs" (i.e. des sites ayant beaucoup de voisins) puis par une contamination hiérarchique des sites de moins en moins connectés.
- Métrologie d'Internet

Le réseau Internet fait partie des réseaux dont la topologie précise est inconnue, car sa croissance n'est pas conçue par une autorité centrale mais se fait de manière "anarchique", les différents fournisseurs d'accès ne se concertant pas pour le développement des connexions. Un des problèmes importants consiste donc à essayer d'obtenir des cartes de ce réseau, et différents projets sont à l'œuvre dans cette optique. Aucune carte n'est cependant complète, et les processus utilisés introduisent des biais incontrôlés. Une modélisation approchée de ces processus a permis la première approche analytique de ce problème: nous avons ainsi relié les propriétés mesurées des réseaux à certaines de leurs propriétés topologiques fondamentales. Nous montrons en particulier que les réseaux à distribution large de connectivité sont typiquement bien échantillonnés; la conclusion est que les distributions larges constatées dans les mesures de la topologie d'Internet sont certainement réelles, même si les exposants mesurés peuvent être biaisés.

Il est à noter que l'activité autour des réseaux complexes est par nature interdisciplinaire; elle nous a permis d'entrer en contact et d'avoir des interactions avec une équipe d'épidémiologie à l'INSERM, ainsi qu'avec la communauté des STIC. Nous participons en particulier à des groupes de travail, et des communications ont été acceptées à des conférences d'informatiques. De plus, deux de nos publications ont été sélectionnées par le "Virtual Journal of Biology".

Références: A. Barrat, M. Barthélemy, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani, *The architecture of complex weighted networks*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. **101** (2004) 3747. M. Barthélemy, A. Barrat, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani, *Velocity and hierarchical spread of epidemic outbreaks in complex networks*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 178701. A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani, *Weighted evolving networks: coupling topology and weights dynamics*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 228701. L. Dall'Asta, I. Alvarez-Hamelin, A. Barrat, A. Vázquez, A. Vespignani, *Traceroute-like exploration of unknown networks: a statistical analysis*, preprint cond-mat/0406404, à paraître dans Lecture Notes in Computer Science.