

# Alain Barrat

## 1 TRAVAUX DE RECHERCHE

### 1.1 Contexte

Mon travail de recherche se déroule au sein de l'équipe de physique statistique du LPT. Les travaux sur les gaz granulaires ont continué, en collaboration avec E. Trizac (LPTMS), A. Puglisi (post-doc), F. van Wijland (LPT) et Paolo Visco (doctorant). Le départ d'A. Vespignani n'a pas ralenti l'activité autour de la nouvelle thématique des réseaux complexes : la collaboration avec le groupe de Vespignani à Indiana University (USA) est restée forte ; au LPT, cette thématique a été développée avec I. Alvarez-Hamelin (post-doc) et L. Dall'Asta qui a soutenu sa thèse de doctorat en juin 2006. La collaboration avec V. Loreto à Rome (qui ces dernières années avait eu comme thème les milieux granulaires) a de plus repris autour de thématiques inspirées par la socio-physique, comme les problèmes de formation d'opinion ou de systèmes de communications.

### 1.2 Milieux granulaires : gaz granulaires

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.

Le cas des granulaires fortement vibrés, ou *gaz granulaires*, est particulièrement intéressant car il fournit un paradigme pour les systèmes en état stationnaire hors d'équilibre. De nombreuses expériences sont menées afin d'explorer la riche phénoménologie de ces systèmes, les instabilités, les distributions de vitesse, etc...

Les études théoriques utilisent en général le modèle des sphères dures inélastiques, qui 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 ( $\alpha$  est appelé coefficient de restitution), et donc de l'énergie est perdue. Usuellement  $\alpha$  est constant ; la limite  $\alpha = 1$  correspond à des sphères parfaitement élastiques.

#### 1.2.1

En collaboration avec M. Ernst et E. Trizac, nous nous sommes intéressés à la généralisation de l'équation de Boltzmann inélastique et au comportement des solutions correspondantes. Cette équation décrit l'évolution de la distribution des vitesses d'un gaz de sphères inélastiques. Différentes formes d'interaction entre sphères, et différents types d'injection d'énergie, correspondent à différentes équations. Bien que l'on ne sache pas les résoudre complètement de manière analytique, il est possible de développer des méthodes pour étudier certaines propriétés de leurs solutions. De plus, un algorithme de simulation permet de résoudre ces équations numériquement avec une grande précision. Nous nous sommes en particulier intéressés au comportement de la distribution à grandes vitesses, en fonction des paramètres d'interaction entre sphères et d'injection d'énergie. Nous avons ainsi montré que ces distributions ont génériquement une forme d'exponentielle étirée, avec de plus des corrections sous-dominantes importantes (qui pourraient fausser l'interprétation

de données expérimentales) ; des comportements en loi de puissance sont obtenus dans des cas de stabilité marginale de l'état stationnaire.

Références :

M. H. Ernst, E. Trizac and A. Barrat, *The rich behavior of the Boltzmann equation for dissipative gases*, Europhys. Lett. **76** (2006) 56.

M. H. Ernst, E. Trizac and A. Barrat, *The Boltzmann equation for driven systems of inelastic soft spheres*, J. Stat. Phys. (2006).

### 1.2.2

Une collaboration avec A. Puglisi, P. Visco, E. Trizac et F. van Wijland a porté sur l'étude de propriétés globales d'un gaz granulaire vibré, comme son énergie cinétique totale, ou la puissance injectée afin de la maintenir dans un état stationnaire. Nous avons d'une part montré comment interpréter de manière simple les récents résultats expérimentaux du groupe de N. Menon qui affirmaient avoir vérifié expérimentalement une extension du « théorème fluctuation » de Gallavotti et Cohen. Grâce à des arguments théoriques et des simulations numériques aussi proches des expériences que possible, nous avons reproduit les résultats expérimentaux et montré qu'ils s'expliquaient sans faire recours au théorème fluctuation. D'autre part, nous avons montré dans une catégorie de modèles de gaz granulaires que l'extension du théorème fluctuation n'est en fait pas valide, même si, sur les échelles de temps accessibles expérimentalement et numériquement, elle semble souvent vérifiée.

Toujours dans le cadre de divers modèles de gaz granulaires vibrés, nous avons étudié et caractérisé le comportement des fluctuations d'énergie cinétique. Lorsque l'énergie est injectée au système par les bords, les hétérogénéités spatiales déterminent ces fluctuations, qui peuvent ainsi être calculées par des approches hydrodynamiques qui négligent les corrélations, alors que des travaux précédents considéraient que ces corrélations étaient responsables de la forme fonctionnelle (non Gaussienne) de la distribution d'énergie. Nous avons également étudié le cas d'une injection d'énergie homogène, qui permet donc de se débarrasser des hétérogénéités spatiales. Dans ce cas, nous avons pu mettre en évidence l'effet (faible, et donc dominé, dans le cas précédent, par l'effet des hétérogénéités) des corrélations de vitesse entre particules, qui sont dues à l'inélasticité des collisions et à la taille finie du système.

Références :

A. Puglisi, P. Visco, A. Barrat, E. Trizac, F. van Wijland, *Fluctuations of internal energy flow in a vibrated granular gas* Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 110202.

P. Visco, A. Puglisi, A. Barrat, E. Trizac, F. van Wijland, *Injected power and entropy flow in a heated granular gas*, Europhys. Lett. **72** (2005) 55.

P. Visco, A. Puglisi, A. Barrat, F. van Wijland, E. Trizac, *Energy fluctuations in vibrated and driven granular gases*, Eur. Phys. J. B **51** (2006) 377.

P. Visco, A. Puglisi, A. Barrat, E. Trizac, F. van Wijland, *Fluctuations of power injection in randomly driven granular gases.*, J. Stat. Phys. (2006).

## 1.3 Réseaux

L'activité concernant l'étude des réseaux complexes a continué et s'est même amplifiée, en collaboration avec M. Barthélemy du CEA, I. Alvarez-Hamelin, L. Dall'Asta du LPT, V. Colizza et A. Vespignani d'Indiana University, R. Pastor-Satorras de Barcelone, V. Loreto et A. Baronchelli de l'université de Rome.

### 1.3.1 Structure des réseaux complexes

Bien que de nombreux travaux aient permis, dans les dernières années, d'obtenir une bonne compréhension globale de la structure des réseaux complexes, un certain nombre de points peuvent encore être explorés ou précisés. Une collaboration avec R. Pastor-Satorras nous a par exemple permis de proposer une méthode analytique permettant de calculer les corrélations entre les degrés de sites voisins pour toute une classe de modèles de réseaux.

D'autre part, à la suite de nos travaux (avec M. Barthélemy et A. Vespignani) portant sur la caractérisation et la modélisation de réseaux complexes pondérés, nous avons étendu notre modèle au cas de réseaux pour lesquels les nœuds résident dans un espace Euclidien et les liens ont un coût dépendant de la distance géographique entre les sites. L'existence de contraintes liées à ces coûts permet de retrouver toute une série de propriétés de réseaux réels comme le réseau des lignes aériennes.

Avec L. Dall'Asta, M. Barthélemy et A. Vespignani, nous avons également examiné l'importance de tenir en compte les hétérogénéités des poids (ou du trafic) dans les études sur la vulnérabilité des réseaux pondérés. Nous avons ainsi montré que les réseaux complexes sont encore plus fragiles si l'on s'intéresse aux propriétés de transport et de trafic que ce que l'on peut déduire d'une analyse purement topologique : la suppression de quelques sites bien choisis peut par exemple donner un réseau topologiquement intact à 80% mais transportant seulement 20% du trafic initial.

Références :

A. Barrat, R. Pastor-Satorras, *Rate equation approach for correlations in growing network models*, Phys. Rev. E **71** (2005) 036127.

A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani, *The effects of spatial constraints in the evolution of weighted complex networks*, J. Stat. Mech. (2005) P05003.

L. Dall'Asta, A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani, *Vulnerability of weighted networks*, J. Stat. Mech. (2006) P04006.

### 1.3.2 Sociophysique

De nombreux modèles de physique statistique ont été développés pour décrire des phénomènes sociaux, comme la dynamique d'opinions et la formation de consensus. Citons par exemple le modèle des Électeurs, où chaque individu peut avoir deux opinions différentes (donc pouvant être modélisées par une variable de spin valant  $+1$  ou  $-1$ ). A chaque instant, un individu pris au hasard choisit un de ses voisins et adopte son opinion. La convergence vers un état uniforme d'opinion a été étudiée par les physiciens statisticiens en particulier pour des individus pouvant interagir sur un réseau régulier en dimension finie. Cependant, l'étude des réseaux complexes a mis en évidence la très forte hétérogénéité des interactions sociales : une majorité d'individus sont peu connectés tandis qu'une fraction non négligeable de personnes a de nombreuses connaissances. En conséquence, de nouvelles études se sont intéressées à la dynamique et à l'évolution de tels modèles définis sur des réseaux d'interactions plus réalistes, fortement hétérogènes. Nous nous sommes particulièrement intéressés à un modèle de formation décentralisée de système de communication entre agents pouvant avoir une mémoire et échanger des informations avec leurs voisins. Nous avons en particulier montré qu'il est plus avantageux que les agents ne puissent pas communiquer tous les uns avec les autres, ni qu'ils forment une topologie régulière (comme un réseau régulier), mais que leur réseau d'interactions soit un « petit-monde ». Nous avons également étudié les différents mécanismes de convergence en fonction de la topologie de ces interactions.

Références :

C. Castellano, V. Loreto, A. Barrat, F. Cecconi, D. Parisi, *Comparison of voter and Glauber ordering dynamics on networks*, Phys. Rev. E **71** (2005) 066107.

A. Baronchelli, L. Dall'Asta, A. Barrat, V. Loreto, *Topology Induced Coarsening in Language Games*, Phys. Rev. E **73** (2006) 015102(R).

L. Dall'Asta, A. Baronchelli, A. Barrat, V. Loreto, *Agreement dynamics on small-world networks*, Europhys. Lett. **73** (2006) 969.

L. Dall'Asta, A. Baronchelli, A. Barrat, V. Loreto, *Non-equilibrium dynamics of language games on complex networks*, Phys. Rev. E **74** (2006) 036105.

### 1.3.3 Réseaux complexes et épidémiologie

Grâce à une série de rencontres avec des chercheurs de l'INSERM, nous avons pu utiliser de nouvelles connaissances en épidémiologie pour les combiner avec notre expertise dans la thématique des réseaux complexes, et en particulier des réseaux de transport. Nous avons ainsi développé un modèle de propagation d'épidémies au niveau mondial, qui utilise le réseau des lignes aériennes. Dans une première étude, nous avons utilisé un modèle simple et peu réaliste de maladie afin de nous focaliser sur des questions d'ordre théorique (nos projets comportent l'étude de modèles plus réalistes de maladies infectieuses). En pratique, chaque site du réseau de transport représente une ville, et donc un ensemble d'individus. On doit alors modéliser l'épidémie à deux niveaux : une dynamique d'infection à l'intérieur de chaque ville (où par exemple on utilise l'approximation de type champ moyen que chaque individu est potentiellement en contact avec tous les autres) et une dynamique de voyage entre les villes, données par la structure complexe et hétérogène du réseau de transport. Les modèles utilisés s'écrivent alors comme une série d'équations de Langevin, pour lesquelles les techniques d'intégration numérique pour les processus stochastiques s'appliquent. Nous avons alors proposé des moyens pour caractériser et quantifier certains aspects importants de la propagation d'une épidémie dans un tel réseau. Par exemple, l'hétérogénéité de la propagation peut être quantifiée par une « entropie », et sa prévisibilité mesurée par le recouvrement entre deux réalisations stochastiques. Ces approches permettent également de comprendre, parmi tous les éléments caractérisant le réseau de transport, lesquels sont les plus influents dans cette hétérogénéité et cette prévisibilité partielle. Par exemple, l'existence de « hubs » ayant un grand nombre de connexions diminue la prévisibilité d'une épidémie en offrant de nombreuses directions possibles de propagation, tandis que la forte disparité des trafics sur les liens tend à la création de chemins préférentiels qui renforcent la possibilité de prévoir la propagation.

Références :

V. Colizza, A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani, *The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. **103** (2006) 2015.

V. Colizza, A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani, *The modeling of global epidemics : stochastic dynamics and predictability*, Bull. Math. Bio. (2006)