

LES LOIS DE LA PHYSIQUE

■ **EN DEUX MOTS** ■ La physique statistique est apparue au XIX^e siècle. Cette discipline explique alors les phénomènes macroscopiques à partir des propriétés des éléments microscopiques qui les composent. Depuis quelques années, les physiciens tentent d'appliquer ses méthodes à des domaines nouveaux : milieux granulaires, réseaux, épidémies.

3 À la recherche des lois universelles

Pour comprendre les phénomènes « émergents », des physiciens statisticiens cherchent à mettre en relation des systèmes divers dont les propriétés sont indépendantes de celles des objets qui les constituent.

Cécile Michaut
est journaliste scientifique.

Rien de commun, diriez-vous, entre un aimant, un tas de sable, un banc de poissons ou une épidémie. Et pourtant ! Pour tous ces exemples, un comportement collectif ordonné « émerge » à partir des interactions entre les objets élémentaires identifiés qui les composent : électrons, grains de sable, poissons ou malades contagieux. De multiples phénomènes peuvent se produire à cette échelle élémentaire. Ils ont beau être très différents, ils n'en engendrent pas moins, parfois, des propriétés « universelles », ainsi nommées car elles sont indépendantes des propriétés microscopiques du système. Ces propriétés caractérisent des gammes de systèmes étonnamment divers, qui peuvent même être régis par les mêmes équations. Ces systèmes sont alors réunis au sein de ce que l'on appelle une « classe d'universalité ».

© ACTO PHOTO/EURELIOS



**LE PHÉNOMÈNE D'AVAN-
LANCHE DE NEIGE** est étudié dans un laboratoire du Cemagref, à Grenoble, avec de la poudre d'argile, afin de collecter des données utiles à une modélisation numérique.

Les propriétés universelles se manifestent notamment lorsque le système change d'« état » (ou de « phase ») : un métal qui devient aimanté, un tas de sable qui s'effondre, des poissons qui changent spontanément de direction, une épidémie qui s'arrête de manière soudaine. La transition de phase est

caractérisée par un « paramètre d'ordre » – la magnétisation d'un métal par exemple, ou le fait qu'une épidémie s'éteigne ou s'active. Plus on est proche du point de transition, plus le paramètre d'ordre devient indépendant du comportement des objets élémentaires.

Comportement collectif

Étudier ces propriétés universelles permettrait de mieux comprendre des systèmes comme celui du tas de sable ou de l'épidémie tant il est vrai que le comportement collectif émergeant de grains de sable ou des malades est difficile à prévoir à partir des objets élémentaires. Dans ce but, depuis une dizaine d'années, les physiciens statisticiens ont quitté les sentiers

LES LOIS DE LA PHYSIQUE

[1] P. Visco et al., *Eur. Phys. J. B*, 51, 377, 2006.

[2] F. Van Wijland, *Phys. Rev. Lett.*, 89, 190602, 2002.

♣ battus de leur discipline pour mettre en évidence des lois de comportements similaires entre des systèmes apparemment très différents.

Depuis le XIX^e siècle, la « physique statistique » s'attache à décrire les transitions de phase et autres phénomènes macroscopiques à partir du comportement des objets élémentaires. Car, dès qu'on a affaire à un grand nombre d'objets, il est impossible de tous les décrire. On ne peut connaître à chaque instant toutes les positions et les vitesses des atomes d'un gaz, par exemple. En revanche, on peut déterminer leur comportement moyen. La température d'un système est ainsi déterminée à partir de la distribution des vitesses des atomes d'un gaz. Des physiciens statisticiens, tel Frédéric Van Wijland, du laboratoire matière et systèmes complexes de l'université Denis-Diderot, tentent d'appliquer ces méthodes à des phénomènes plus complexes : « *Nous simplifions à l'extrême le comportement d'un système pour découvrir des comportements universels qui peuvent être modélisés de la même façon* », explique ce dernier.

Équations de Langevin

La première étape consiste à déterminer quelles grandeurs, quels paramètres d'ordre, permettent de bien décrire le système. « *Nous cherchons des grandeurs collectives, par exemple la hauteur moyenne d'un tas de sable dans le cas des avalanches, ou encore, en chimie, la quantité de réactifs dans les phénomènes catalytiques* », précise F. Van Wijland. *Nous modélisons ce qui se passe lorsque l'on fait évoluer le système au niveau microscopique, et nous cherchons à mettre en équation les tran-*

sitions de phase. Pour cela, nous utilisons des techniques mathématiques telles que les "équations de Langevin" et les "groupes de renormalisation" (lire « La renormalisation », p. 35). Nous comparons alors nos résultats théoriques aux résultats expérimentaux, lorsqu'ils existent, afin de vérifier que nous n'avons pas négligé une grandeur importante, ou que nous n'avons pas trop simplifié la formulation d'un problème. »

Parmi les sujets qui posent le plus de difficultés aux physiciens statisticiens, on trouve les milieux granulaires (sable, billes, poudres). La description statistique

de ces systèmes est particulièrement délicate, car de l'énergie est dissipée lors des collisions entre les objets élémentaires. Les phénomènes qui émergent du comportement collectif des grains sont nombreux, et les transitions de phases sont difficiles à caractériser dans ces systèmes ni tout à fait solides, liquides ou gazeux.

Alain Barrat, du laboratoire de physique théorique de l'université d'Orsay, étudie notamment l'état et le passage à l'état « fluidifié » des milieux granulaires. Pour cela, des billes de sable ou de verre sont déposées dans un récipient fermé que l'on secoue vigoureusement. La mesure des paramètres physiques (densité locale, vitesse des billes, etc.) nécessite des moyens de détection sophistiqués, telles l'imagerie par résonance magnétique ou des caméras ultrarapides. « *Lorsque les grains sont peu denses, nous décrivons assez bien leur comportement*, indique A. Barrat. *Quand la densité augmente, en revanche, et que les grains bougent moins, nous sommes plus démunis.* » En outre, un gros grain disposé au milieu d'autres plus petits tendra généralement à remonter lorsqu'on secoue l'ensemble. Mais selon les conditions (taille des grains et agitation), on peut observer l'effet inverse !

« *Nous n'avons pas encore réussi à trouver les lois générales permettant d'expliquer ces phénomènes de ségrégation, et plus généralement les phénomènes collectifs qui se produisent au sein des matériaux granulaires* », reconnaît F. Van Wijland [1]. Le fait est que certaines études expérimentales donnent lieu à des résultats contradictoires. Les recherches se poursuivent, et les progrès seraient forts utiles à l'industrie agroalimentaire et du médicament, aux prises avec des questions d'écoulement de grains et de mélange de différentes substances.

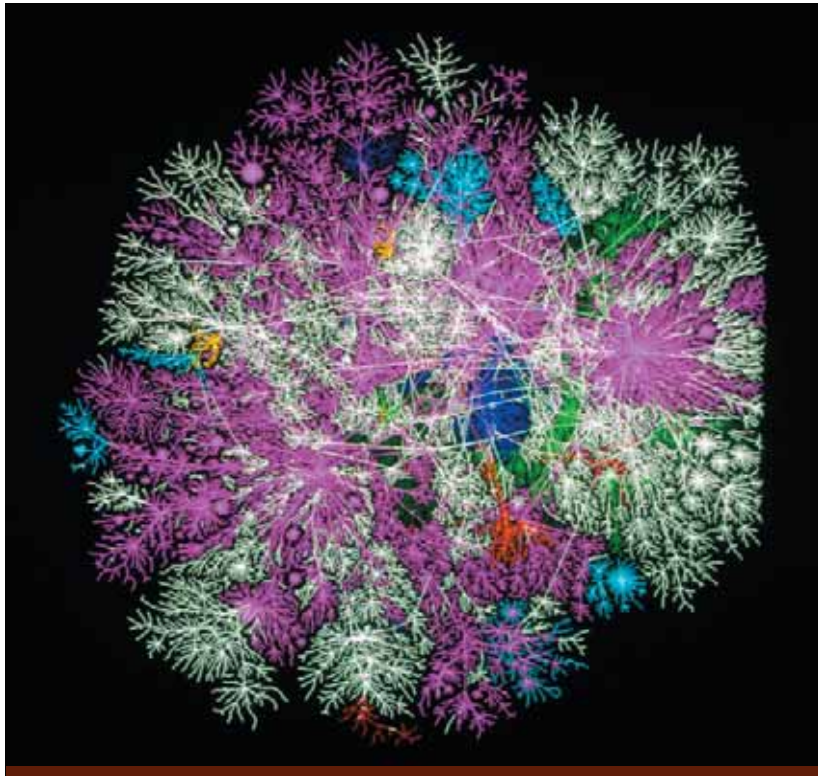
F. Van Wijland et A. Barrat cherchent aussi à appliquer les méthodes de la physique statistique en dehors du champ d'étude traditionnel de leur discipline. Avec un certain succès. Par exemple, ils ont montré que certains modèles développés pour expliquer le magnétisme ou d'autres phénomènes physiques présentant un changement de phase permettaient de décrire certains aspects de la propagation des épidémies [2].

En simplifiant à l'extrême, les épidémies peuvent être

Les milieux granulaires – sable, billes, poudre – sont difficiles à décrire statistiquement



UN BANC DE BARRACUDAS présente une forme tubulaire extrêmement difficile à modéliser. Elle résulte du comportement collectif de chacun des poissons, qui choisit une direction en fonction de sa position antérieure et des positions et des directions des poissons qui l'entourent. © ODILE GAUTIER/BIOS



LES « CARTES » DES RÉSEAUX INTERNET montrent l'existence d'une topologie complexe et hétérogène aux fluctuations statistiques très importantes, que l'on peut étudier avec les outils mathématiques développés en physique statistique.

© GANDY/SPL/COSMOS

LES LOIS DE LA PHYSIQUE

la même semaine des gens se trouvant à Tokyo, New York et Londres. Par ailleurs, certaines personnes sortent peu de leur domicile, et ont donc très peu de contacts avec d'autres gens. D'autres, au contraire, ont une vie sociale intense, et sont davantage susceptibles de contaminer ou d'être contaminées. Ces « superpropagateurs » ont notamment été présents lors des débuts de la contamination du virus du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) en 2003.

L'intérêt de ce modèle épidémiologique n'est toutefois pas seulement théorique [3]. Beaucoup de décideurs se demandent quoi faire en cas d'épidémie importante. Faut-il, par exemple, limiter les voyages aériens ? « Nos modèles montrent que réduire globalement les voyages est peu efficace, car cela ne modifie pas l'étendue de l'épidémie mais la retarde légèrement, explique A. Barrat. En revanche, "filtrer" les voyageurs malades est bien plus efficace : on évite ainsi que les superpropagateurs infectent de nombreuses personnes. »

Les travaux d'Alessandro Vespignani, de l'université d'Indiana aux États-Unis, et de Romualdo Pastor-Satorras, de l'université polytechnique de Catalogne à Barcelone, montrent que ce modèle de propagation d'épidémies s'applique à d'autres types d'objets élémentaires mis en réseaux [4]. Dans les réseaux informatiques, par exemple, une question centrale est celle de leur résistance à des pannes ou à des attaques ciblées de pirates informatiques. De même qu'il existe des personnes cloîtrées chez elles et des personnes ayant une vie sociale intense, de même certains ordinateurs sont peu connectés, tandis que les gros serveurs en relient des centaines de milliers.

En effet, un nouveau connecté ira de préférence vers les sites déjà très consultés, qui verront encore leur audience s'accroître. « Cette hétérogénéité rend les réseaux très résistants aux pannes, précise A. Barrat. En effet, il existe une majorité de sites peu liés aux autres, et leur déconnexion n'entraîne pas de dysfonctionnement majeur. En revanche, une attaque ciblée sur quelques sites parmi les plus connectés a des conséquences bien plus importantes, car elle désintègre le réseau en petites composantes isolées. » La physique statistique fournit ainsi des outils adaptés, et de plus en plus utilisés, à l'étude de l'émergence de comportements complexes et globaux. Elle tend à montrer que les principes d'organisation priment sur la compréhension du comportement des objets élémentaires d'un système, et que des principes similaires se manifestent dès qu'un grand nombre d'objets interagissent. ■ C. M.

[3] V. Colizza et al., *PNAS*, 103, 2015, 2006.

[4] R. Pastor-Satorras et A. Vespignani, *Internet, structure et évolution*, Belin, 2004.

modélisées en prenant en compte deux types de populations : les personnes saines et les personnes infectées, contagieuses. Les individus se déplacent, et une personne saine rencontrant une personne infectée a une certaine probabilité d'être elle-même infectée. Une personne infectée guérit au bout d'un certain temps. Cette situation est analogue à ce qui se passe dans un aimant, où les interactions se produisent seulement entre atomes voisins. L'aimantation se propage de proche en proche et donne naissance à un ordre magnétique à longue distance. Celui-ci apparaît brusquement, lorsque l'interaction entre les atomes devient plus forte que le désordre dû à l'agitation thermique : on observe alors une transition de phase, due aux interactions entre proches voisins.

Superpropagateurs

« Les modèles d'épidémies offrent deux issues : soit l'ensemble d'une population est guéri et l'épidémie disparaît, soit il reste indéfiniment une proportion de gens infectés », constate F. Van Wijland. Ce dernier a mis en équation les changements d'état dans les modèles d'épidémies. Il a découvert que, pour plusieurs d'entre elles, la transition présentait des propriétés universelles appartenant à la même classe que les phénomènes d'aimantation et de réactivité chimique dite « auto-catalytique ».

Ce modèle est cependant encore trop simpliste pour bien expliquer la propagation des épidémies, surtout les plus récentes. La contamination de proche en proche est moins pertinente en raison du développement des transports aériens : certains grands voyageurs peuvent contaminer