Frustration, désordre, systèmes complexes: la physique statistique hors des murs.

Marc Mézard

October 3, 2002

Comment émergent les phénomènes collectifs dans des systèmes comprenant beaucoup d'atomes? Comment peuvent-ils donner lieu à des comportements qualitativement nouveaux, impossibles à deviner à partir de ce que l'on connaît sur un atome isolé? Comment développer les différents niveaux de description, du microscopique au macroscopique, et les relier l'un à l'autre? Ces questions, posées dès l'origine de la physique statistique, suggèrent un projet extraordinairement ambitieux.

En effet, si l'on considère déja le champ traditionnel de cette discipline, on y voit abordés des problèmes aussi divers que la structure des étoiles à neutrons, la thermodynamique classique ou les condensats de Bose. Or voici que la physique statistique commence à s'intéresser à des sujets sortant de son périmètre habituel: il n'est pas rare de rencontrer des physiciens travaillant sur les codes de correction d'erreur pour la transmission d'information ou sur des modèles de marchés financiers fondés sur l'analyse du comportement d'agents en interaction.

Une des origines de cette évolution se trouve au coeur même du domaine. Longtemps concentrée sur des systèmes homogènes, ou comportant peu de défauts (c'est l'étude du fluide simple, ou bien celle du cristal), la physique statistique s'est attaquée depuis une bonne vingtaine d'années aux systèmes en interaction fortement désordonnés, où chaque atome voit un environnement différent de celui vu par les autres atomes: C'est le cas des phases vitreuses, verres structuraux (où les positions relatives des atomes se figent dans une structure non périodique), et verres de spin (où ce sont des moments magnétiques qui se figent dans des directions "imprévisibles").

Ce caractère désordonné, qui empêche toute approche fondée sur la description d'un "atome représentatif" interagissant de manière autocohérente avec le milieu effectif dû aux autres atomes, est bien souvent associé à un effet de frustration: l'existence de contraintes antagonistes interdit de trouver une configuration d'énergie minimale par une simple optimisation des structures locales. De tels systèmes vont donc posséder génériquement de nombreux "états métastables", minima locaux de l'énergie qui ralentissent considérablement l'évolution dynamique, d'où les temps de relaxation extraordinairement longs souvent observés dans les systèmes vitreux, qui continuent de vieillir des années après leur fabrication...

Dès lors que l'on étudie des comportements collectifs d'atomes qui sont tous distincts, ou dans des environnements distincts, il devient naturel de s'intéresser aux cas ou les "atomes" sont de nature différente. Par exemple il pourra s'agir d'agents en interaction sur un marché, chacun suivant sa propre stratégie. Dans le domaine du traitement et transfert d'information, ou de certains problèmes d'optimisation combinatoire et d'inférence statistique, l'atome sera un "bit" d'information. La frustration crée de nombreux états collectifs possibles (des "attracteurs" de la dynamique de ces systèmes) que l'on cherche suivant les cas à éliminer ou contourner (optimisation, codes de correction d'erreurs) ou à contrôler pour les exploiter (mémoires associatives). C'est par ce type de démarche qu'ont été conçus des algorithmes d'optimisation radicalement nouveaux, et que l'on a développé certains cadres conceptuels pour l'étude des réseaux de neurones, (qu'ils s'agisse d'analyser des données de neurobiologie, ou bien d'imaginer de nouveaux modes de fonctionnement des ordinateurs).

C'est donc un vaste monde qui s'ouvre à la physique statistique. Discipline "de service", elle ne doit pas perdre de vue qu'on ne peut se dispenser ni de l'expertise déja acquise, ni de l'étude détaillée de chacun des problèmes qu'elle va y rencontrer. En échange, elle peut offrir certains concepts, certaines techniques analytiques ou numériques, exploitant les simplifications apparaissant en présence d'un grand nombre de degrés de liberté, et parfois l'idée neuve suggérée par l'expérience acquise sur des problèmes similaires rencontrés dans un cadre différent. C'est donc probablement l'un des maillons indispensables à l'épanouissement de la science moderne vers cet état baptisé par E.O. Wilson de "consilience", où l'on saura vraiment construire les ponts entre les analyses à différentes échelles, et donc entre les disciplines.