

comme plus fondamentales, de ses constituants et de leurs relations mutuelles.

Cependant, ce changement d'échelle fait apparaître des propriétés nouvelles, émergentes, dues à l'organisation et au comportement collectif des composants, propriétés *a priori* imprévisibles en raison du nombre gigantesque de composants. Les succès de la biologie moléculaire dans la compréhension des êtres vivants, les apports de la physique moléculaire à la chimie, illustrent l'efficacité de cette démarche unificatrice.

En physique, on a commencé à la fin du XIX^e siècle à montrer que les lois régissant les matériaux à notre échelle peuvent se déduire de lois relatives à l'échelle atomique. Tel est l'objet de la mécanique statistique, dont les premiers succès ont porté sur les gaz.

Auparavant, vers 1865, la physique du continu triomphait. Mais la nature de la chaleur et, en conséquence, la signification de l'entropie restaient à élucider. L'hypothèse selon laquelle la matière serait constituée de molécules, dont le mouve-

ment se manifesterait à nous sous forme de pression et de chaleur, n'avait encore aucun support expérimental ; elle était devenue hétérodoxe après avoir été courante un siècle auparavant. En s'appuyant néanmoins sur cette idée, James Clerk Maxwell en Écosse, puis Ludwig Boltzmann à Vienne, face à l'hostilité de scientifiques éminents, parvinrent non seulement à expliquer les propriétés, déjà connues, des gaz à l'équilibre, mais surtout à prévoir avec succès les comportements, inattendus, de la viscosité et de la conductivité calorifique des gaz en fonction de leur densité et leur température.

Un tel succès se heurtait pourtant à une objection mathématique sérieuse, le « paradoxe de l'irréversibilité », souligné par l'Autrichien Josef Loschmidt en 1876, le Français Henri Poincaré en 1889, et l'Allemand Ernst Zermelo en 1896. La théorie cinétique des gaz de Maxwell et Boltzmann repose uniquement sur les équations du mouvement des molécules, qui décrivent leurs déplacements dans une enceinte et les collisions élastiques qu'elles

subissent entre elles ou sur les parois. Or ces équations sont invariantes lorsqu'on y change le signe du temps. Comment comprendre alors que ces seules équations, réversibles, puissent donner naissance aux lois qui gouvernent le comportement macroscopique du gaz constitué par ces molécules, et en particulier aux irréversibilités exprimées par le deuxième principe de la thermodynamique ? Tel est le paradoxe de l'irréversibilité.

Comment émerge l'irréversibilité

L'élucidation de ce paradoxe a été suggérée par Boltzmann et rendue rigoureuse au cours des décennies suivantes. Nous allons l'esquisser sur un modèle simple. Considérons une enceinte constituée de deux parties A et B de même volume V . Un gaz de N molécules est initialement introduit dans la partie A, qui est ensuite mise en communication avec la partie B (voir la figure 2). L'état macroscopique de sa configuration initiale,

IRRÉVERSIBILITÉS QUANTIQUES

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux sont consacrés à des irréversibilités d'un type différent. À l'échelle atomique, les objets obéissent aux règles de la mécanique quantique. C'est là une source de phénomènes étranges tels que la « cohérence », possibilité pour un système d'être dans un état où se superposent deux configurations différentes. On peut par exemple préparer un atome en sorte qu'il soit à la fois dans son état fondamental et dans un état excité ; si cette situation pouvait se présenter à notre échelle, un « chat de Schrödinger » pourrait être à la fois mort et vivant. L'exploitation de telles propriétés singulières est susceptible de conduire à des « ordinateurs quantiques » extrêmement puissants ; elle est cependant difficile, car la cohérence quantique est souvent détruite en un temps extrêmement bref.

Ce phénomène irréversible, nommé décohérence, est causé par les faibles interactions incontrôlées du système avec son environnement. S'il était isolé, le système évoluerait de façon réversible selon l'équation de Schrödinger (qui régit son comportement au cours du temps) et conserverait sa cohérence quantique ; ici, l'irréversibilité est due au couplage avec le grand nombre de degrés de liberté de l'environnement.

La théorie quantique est irréductiblement probabiliste. Lorsqu'on effectue des mesures sur des objets quantiques préparés dans des conditions identiques, on trouve en général des résultats différents, affectés de certaines probabilités. Mais chaque mesure fournit un résultat unique, bien défini, même lorsque l'objet est dans un état superposé. Cette propriété, nommée « réduction du paquet d'ondes », implique une irréversibilité, et semble donc en contradiction avec la réversibilité de l'équation de Schrödinger.

Ce « problème de la mesure », posé dès les années 1920, fait encore l'objet de discussions. On invoque souvent une décohérence due à l'environnement. Une autre solution, proposée en 2003 par

Armen Allahverdyan, de l'Institut de physique d'Erevan (Arménie), Theo Nieuwenhuizen, de l'Université d'Amsterdam, et l'auteur (R. Balian), repose sur le caractère macroscopique de l'index de l'appareil de mesure. En résolvant l'équation de Schrödinger du système appareil-objet, on détermine, pour un ensemble de mesures, la loi de probabilité qui gouverne les configurations finales issues d'un état initial donné. On déduit alors du grand nombre de degrés de li-

berté de l'index qu'une indication bien définie émerge avec une quasi-certitude lors de chaque mesure.

Cette solution du problème de la mesure, comme celle du paradoxe de l'irréversibilité, est probabiliste : les propriétés de la mesure quantique ne sont pas établies dans l'absolu, mais avec une probabilité qui tend vers 1 lorsque l'appareil devient grand.

La mesure en mécanique quantique est un processus qui met en jeu de l'irréversibilité.

