

Des fluctuations à la

U. Marini Bettolo Marconi, A. Puglisi,
L. Rondoni et A. Vulpiani

À l'équilibre thermodynamique, un système composé d'un grand nombre de particules présente de petites fluctuations spontanées. Des théorèmes de la physique statistique relient ces fluctuations au comportement du système hors d'équilibre.

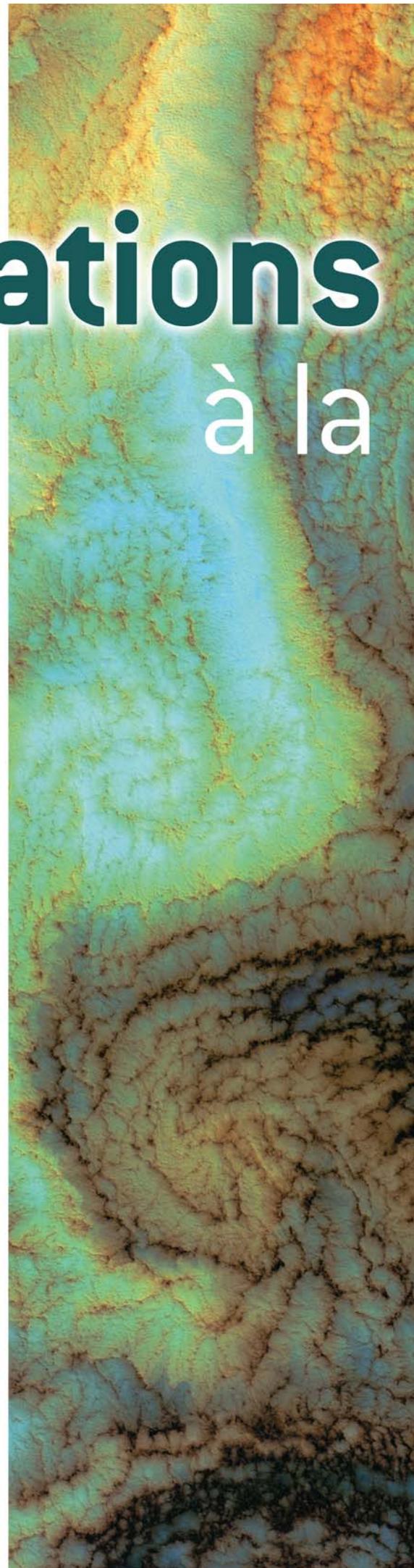
Mettez en marche n'importe quel appareil électrique : un courant électrique circule sous l'effet d'une tension, ou différence de potentiel électrique, entre les extrémités d'un fil métallique. Ce phénomène nous paraît banal. Pourtant, à y regarder de plus près, on peut y voir une illustration d'un domaine important de la physique théorique d'aujourd'hui.

Le courant électrique constitue la réaction des électrons du métal à la différence de potentiel appliquée. D'après la loi d'Ohm, l'intensité du courant est proportionnelle à la différence de potentiel électrique, la constante de proportionnalité étant l'inverse de la résistance du fil. Une question intéressante, qui est au cœur du présent article, est la suivante : peut-on calculer cette résistance sans appliquer de tension ? En d'autres termes, peut-on déterminer la réaction des électrons à la tension appliquée en connaissant juste leur comportement en l'absence de champ électrique ?

Plus généralement, la question est de savoir si l'on peut comprendre le comportement hors d'équilibre d'un système constitué d'un grand nombre de particules en examinant¹ seulement ses propriétés à l'équilibre ; ou, inversement, si l'on peut inférer ses propriétés à l'équilibre à partir d'expériences réalisées dans des situa-

L'ESSENTIEL

- ✓ Il existe des liens entre les fluctuations que présente un système à l'équilibre et la façon dont il réagit à une petite perturbation et revient vers l'état d'équilibre.
- ✓ Les physiciens ont pu généraliser ces relations de fluctuation aux états proches de l'équilibre, ainsi qu'à certaines situations éloignées de l'équilibre.
- ✓ De telles relations servent par exemple à étudier la physique des macromolécules, comme les protéines.





dissipation

1. LE THÉORÈME DIT DE FLUCTUATION-DISSIPATION relie les fluctuations spontanées d'un système physique à l'équilibre à sa réaction à une brève perturbation externe. Les relations entre fluctuations et dissipation ont été établies à l'origine pour des systèmes proches de l'équilibre. Les physiciens et les mathématiciens sont parvenus à en obtenir des versions valables dans certaines situations éloignées de l'équilibre, comme les écoulements turbulents stationnaires (présentant des structures stables, statistiquement, dans le temps). L'image montre un tel écoulement dans un contexte météorologique. Ces tourbillons dits de von Karman, photographiés par le satellite Landsat 7, ont été créés par des vents soufflant de l'Est sur les îles Aléoutiennes de l'Alaska.

Systemes hors d'equilibre

Un systeme macroscopique est à l'equilibre mecanique quand la resultante des forces auxquelles le systeme est soumis est nulle. Des reactions chimiques et des deplacements de matiere peuvent modifier l'etat d'un systeme à l'equilibre mecanique. Si ce n'est pas le cas, le systeme est également à l'equilibre chimique. Le systeme est en outre à l'equilibre thermique si son etat ne varie pas quand on l'extrait de son milieu et qu'on l'entoure de parois adiabatiques (qui empêchent les échanges de chaleur). On dit que le systeme est à l'equilibre thermodynamique quand il est en equilibre mecanique, chimique et thermique. Dans ces conditions, toutes

les parties du systeme ont la même temperature, qui est également la temperature du milieu extérieur. Par conséquent, l'etat du systeme peut être caracterisé par quelques grandeurs globales et constantes dans le temps (par exemple la pression, la temperature, etc.).

L'absence d'equilibre mecanique conduit à une accélération, à de la turbulence, à des ondes, etc. L'absence d'equilibre chimique conduit à des variations de composition chimique du systeme ou à des deplacements de matiere. L'absence d'equilibre thermique conduit à des flux de chaleur.

Si le systeme n'est pas à l'equilibre thermodynamique et n'interagit pas avec le milieu

extérieur, son etat evolue jusqu'à ce que l'equilibre soit atteint. Cependant, l'interaction du systeme avec le milieu extérieur empêche parfois cette relaxation vers l'equilibre; il y a alors dissipation d'énergie, et l'on peut obtenir des etats stationnaires hors d'equilibre, où certaines grandeurs restent constantes.

Un thermos de café chaud peut, durant quelques heures, être considéré comme un systeme à l'equilibre. En revanche, un courant électrique dans un fil metallique est un systeme hors d'equilibre: son existence n'est en fait possible que s'il existe une difference de potentiel électrique entre les deux extremités du fil.

tion-dissipation, puis nous décrirons à grands traits les progrès récents réalisés dans ce domaine. Nous mentionnerons une application de ces développements théoriques à la physique des protéines et, pour terminer, nous discuterons de leur pertinence pour l'étude du climat.

Le mouvement brownien, un exemple historique

Comme nous l'avons signalé, le premier exemple de relations entre fluctuations et dissipation concerne le mouvement brownien. Einstein et, indépendamment, le physicien polonais Marian Smoluchowski ont montré qu'en observant au microscope le mouvement de grains microscopiques en suspension dans un liquide, il est possible d'en déduire le nombre de molécules contenues dans une mole du liquide, c'est-à-dire le nombre d'Avogadro (par définition, ce nombre correspond au nombre d'atomes contenus dans 12 grammes de l'isotope 12 du carbone). Cette analyse théorique a été testée avec succès en 1909 par les expériences du physicien français Jean Perrin, qui ont constitué une preuve décisive de l'existence des atomes ou des molécules, et de leur rôle dans le mouvement aléatoire des grains.

Pour obtenir ce résultat crucial, Einstein et Smoluchowski ont considéré les deux effets produits par les molécules du fluide sur un objet de taille microscopique, mais beaucoup plus gros que ces molécules. Le premier d'entre eux est un effet de fluctuation: en raison des impulsions communiquées par les chocs incessants avec les molécules du fluide, la vitesse de l'objet en suspension augmente et diminue de façon irrégulière, c'est-à-dire que cette vitesse présente des fluctuations imprévisibles. Le second effet est celui de «relaxation», ou retour à l'equilibre, que l'on nomme aussi dissipation ou réponse: si l'objet subit une force extérieure durant un intervalle de temps très court, sa vitesse se modifie brusquement, puis décroît vers zéro (ou, plus généralement, vers la vitesse moyenne du fluide).

Quelle est la relation entre ces deux effets? Considérons une fluctuation de la vitesse du grain en suspension dans un fluide, fluctuation où la vitesse croît jusqu'à un certain maximum, qui est atteint à l'instant t_0 , puis décroît vers zéro, sa valeur

tions hors d'equilibre (voir la figure 1 et l'encadré page ??).

Tel est l'enjeu essentiel posé par le problème dit de fluctuation-dissipation. Cette question joue un rôle fondamental en physique statistique, qui cherche à décrire le comportement macroscopique d'un systeme à partir de ses propriétés microscopiques.

Les relations (ou théorèmes) de fluctuation-dissipation sont apparues il y a plus d'un siècle avec l'analyse par Albert Einstein du mouvement brownien – le mouvement erratique dont sont animées des particules microscopiques en suspension dans un fluide, ces particules étant poussées au hasard par les chocs avec les molécules du fluide (voir l'encadré page ??). Les relations de fluctuation-dissipation ont ensuite été étudiées notamment par le chercheur d'origine norvégienne Lars Onsager durant les années 1930 et par le Japonais Ryogo Kubo dans les années 1950. Elles ont connu un renouveau d'intérêt au cours des décennies récentes, notamment en raison des progrès réalisés dans les techniques expérimentales et les simulations numériques. Ces avancées, en donnant accès à des détails de plus en plus fins du comportement d'un systeme physique et de ses fluctuations, posent aux théoriciens de nouvelles questions et défis.

Nous commencerons par expliquer quelle est l'idée des relations de fluctua-

LES AUTEURS

Umberto MARINI BETTOLO MARCONI est professeur de physique de la matiere condensée à l'Université de Camerino, en Italie.

Andrea PUGLISI est chercheur du CNR-INFM (Institut national de physique de la matiere, Conseil national de la recherche, en Italie) à l'Université de Rome «Sapienza».

Lamberto RONDONI est professeur de physique mathématique au Politecnico de Turin.

Angelo VULPIANI est professeur de physique théorique à l'Université de Rome «Sapienza».

moyenne. La décroissance de la vitesse du grain après cette fluctuation (voir la figure 2a) ressemble à la façon dont le grain retrouve sa vitesse d'équilibre après avoir été perturbé par une force extérieure appliquée brièvement (voir la figure 2b). Supposons que la perturbation externe communique au grain une vitesse de même valeur que celle due à la fluctuation spontanée. Le détail du retour à l'équilibre après une perturbation ou de la décroissance de la vitesse à la suite d'une fluctuation spontanée diffère d'une expérience à l'autre. Cependant, en moyenne, la relaxation de la vitesse à la suite d'une perturbation est identique à la décroissance de la vitesse à la suite d'une fluctuation: telle est la signification fondamentale de la relation entre fluctuation et dissipation.

Plus généralement, une relation de fluctuation-dissipation exprime la relation entre les fluctuations d'un système non perturbé et une fonction de réponse appropriée. C'est une réponse formelle à la question du courant électrique posée au début de cet article: il est en principe possible de calculer la résistance électrique d'un fil, qui est une réponse à la différence de potentiel appliquée, à partir des propriétés du fil en l'absence de tension électrique. Un autre exemple classique est la chaleur spécifique d'un système de N particules, qui est directement reliée aux fluctuations de l'énergie de ce système (voir l'encadré page ??).

Un lien entre fluctuations et retour à l'équilibre

Dans la période qui a suivi les recherches d'Einstein et de Smoluchowski sur le mouvement brownien, des physiciens et des mathématiciens ont vérifié la relation de fluctuation-dissipation dans un certain nombre d'expériences et de modèles théoriques. Ces travaux ont conduit à la conclusion que les principaux aspects statistiques du comportement de systèmes relativement petits (agrégats d'atomes ou de molécules, particules colloïdales, etc.) sont bien décrits par un terme systématique (déterministe), qui correspond à de la dissipation, terme auquel s'ajoute une contribution fluctuante, aléatoire.

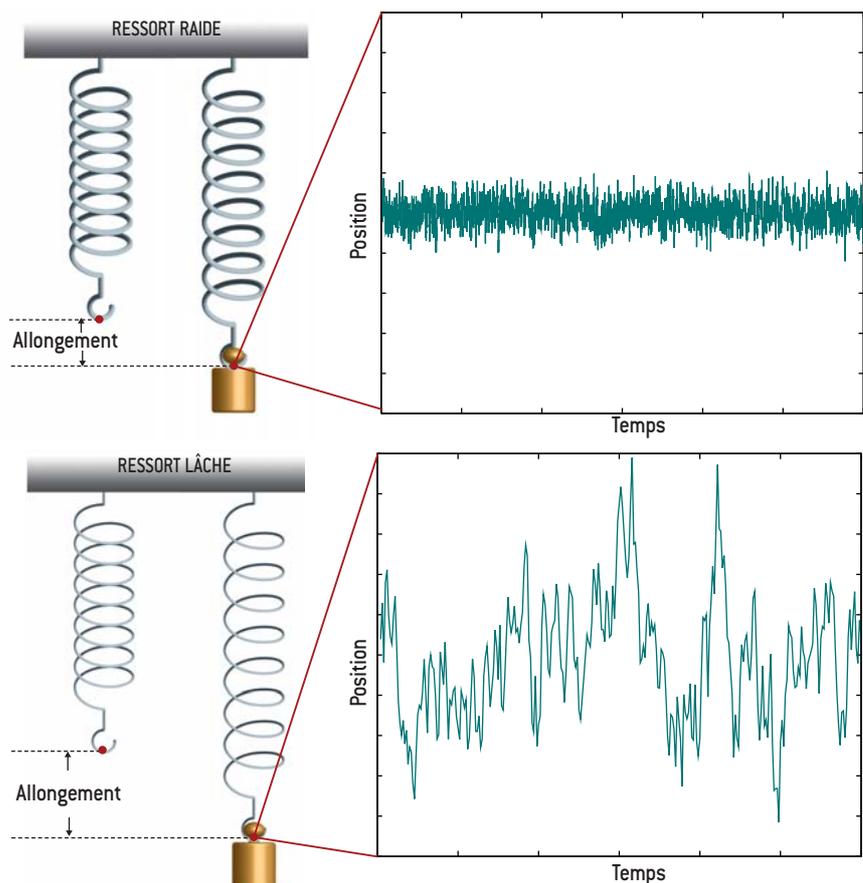
En 1931, Onsager a émis l'hypothèse que la relation fluctuation-dissipation est universelle et l'a généralisée à tout système

proche de l'équilibre. En particulier, il a supposé que si le système reste dans un état proche de l'équilibre, les moyennes des grandeurs physiques «répondent» aux perturbations externes en décroissant de la même façon que les fonctions d'autocorrélation du système non perturbé (la fonction d'autocorrélation $f(t)$ d'une grandeur donnée X est la moyenne du produit $X(0)X(t)$, c'est-à-dire le produit de sa valeur à l'instant initial $t = 0$ par sa valeur à un instant quelconque t , la moyenne étant calculée sur tous les états initiaux possibles; de telles fonctions de corrélation sont expérimentalement mesurables).

En d'autres termes, la relation de fluctuation-dissipation établit que le comportement d'un système hors d'équilibre, mais proche de l'équilibre, peut être compris en termes de moyennes de grandeurs physiques calculées ou mesurées dans les états d'équilibre.

Vingt ans plus tard, Kubo démontra la validité générale de la relation de fluctuation-dissipation pour les systèmes proches de l'équilibre. Il obtint également des formules très utiles pour calculer ce qu'on appelle des coefficients de transport. Ces coefficients expriment la réaction de quantités plus complexes aux perturbations externes. Par exemple, la conductivité thermique d'un matériau caractérise la réponse du matériau à une différence de température, la viscosité de cisaillement d'un fluide caractérise la réaction de ce fluide à une force de cisaillement, etc.

Les scientifiques ont mis une cinquantaine d'années à se rendre compte et à démontrer que la relation de fluctuation-dissipation s'applique de façon générale aux systèmes proches de l'équilibre. La «théorie de la réponse linéaire» qui est issue de ce long processus est, encore aujourd'hui, l'un des outils les plus puissants de la



2. L'ESSENCE DE LA RELATION DE FLUCTUATION-DISSIPATION peut être illustrée simplement par le comportement d'un ressort auquel est suspendu un poids. Sous l'action de ce poids, le ressort s'allonge d'une certaine quantité. Moins le ressort est raide, plus cet allongement est important. En situation d'équilibre mécanique et thermique, la position de l'extrémité du ressort présente de petites fluctuations spontanées au cours du temps. Plus l'allongement est grand, plus ces fluctuations sont importantes. Le lien entre les fluctuations à l'équilibre de la position du ressort et son allongement sous l'effet d'une force extérieure est une relation de type fluctuation-dissipation.

Les relations de fluctuation ont d'ores et déjà élargi notre compréhension de la matière.

physique statistique hors d'équilibre. La pertinence du théorème de fluctuation-dissipation est due à sa double nature: c'est non seulement un résultat théorique fondamental et général, c'est aussi un outil commode pour faire des prédictions.

De nos jours, avec les progrès de la puissance de calcul des ordinateurs et des techniques expérimentales, les scientifiques ont la possibilité d'explorer la matière à des échelles inférieures au micromètre, proches du nanomètre. Les physiciens ont ainsi rencontré de nouvelles classes de systèmes dont les fluctuations jouent un rôle important, ce qui les a poussés à tenter de généraliser le théorème de fluctuation-dissipation à des états éloignés de l'équilibre. Cela a conduit au vaste champ des «relations de fluctuation» découvert pour la première fois en 1993 par les chercheurs australiens Denis

Evans et Gary Morris, et l'Américain Ezechiel Cohen, et formalisé deux ans plus tard par Giovanni Gallavotti, de l'Université de Rome, et E. Cohen.

Les relations de fluctuation portent sur une grandeur nommée «production d'entropie», qui représente la dissipation, l'entropie étant une grandeur thermodynamique qui reflète le désordre du système. Elles s'appliquent à des perturbations qui ne sont pas forcément petites et à des états qui ne sont pas nécessairement proches de l'équilibre. Ultérieurement, les physiciens ont mis au jour des relations de fluctuation pour différentes grandeurs, la plupart concernant les fluctuations de la chaleur échangée par le système considéré avec un dispositif externe. Ces relations ont été testées et vérifiées dans des expériences portant sur des systèmes de petite taille, c'est-

Le mouvement brownien

En 1827, le botaniste écossais Robert Brown observa des grains microscopiques (provenant de pollen) en suspension dans de l'eau, et remarqua que chaque grain effectuait un mouvement erratique. Ce phénomène est aujourd'hui connu sous le nom de mouvement brownien. Des décennies durant, son importance a été sous-estimée et il n'a été compris que vers 1905, grâce aux travaux d'Einstein et, indépendamment, de ceux du physicien polonais Marian Smoluchowski.

Quelques années plus tard, le physicien français Paul Langevin proposa une description du mouvement brownien sous la forme d'une équation différentielle stochastique (c'est-à-dire une équation différentielle où certains termes désignent des grandeurs aléatoires). Cette équation décrit la force totale agissant sur une petite particule comme la somme d'une force de frottement bien déterminée, due au liquide considéré comme un milieu continu, et d'une force aléatoire résultant des collisions avec les molécules du liquide. Einstein comme Langevin faisaient deux hypothèses. La première est que la force de frottement agissant sur la petite particule est donnée par la «loi de Stokes», laquelle décrit la force de frottement exercée par un

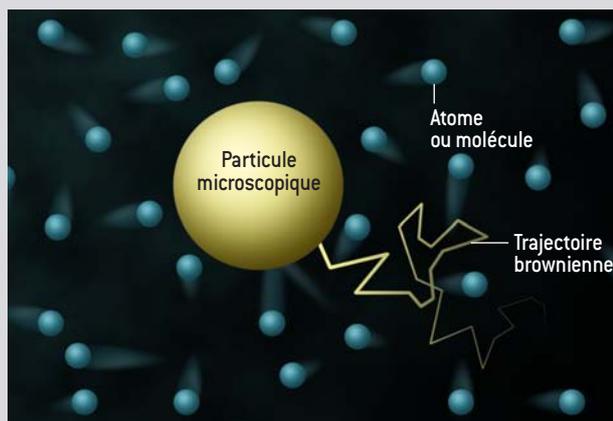
fluide sur un corps macroscopique. La seconde hypothèse est que le théorème de l'équipartition de l'énergie cinétique s'applique, c'est-à-dire que l'énergie cinétique moyenne du grain est égale à l'énergie cinétique moyenne d'une molécule du fluide.

À l'aide de ces deux hypothèses simples, Einstein et Langevin ont prédit qu'une particule brownienne diffuse, c'est-à-dire qu'elle se déplace de façon irrégulière et que, pour des temps t assez longs, le carré de sa distance au point de départ est en moyenne approximativement égal à $6Dt$, où D est une constante nommée coefficient de diffusion. Ils ont montré que le coefficient de diffusion D , qui est une propriété du système en l'absence de toute perturbation, est relié à la mobilité μ , qui mesure comment la vitesse de la particule répond à une petite force de frottement, par la formule :

$$\mu = D/(k_B T),$$

où k_B est la constante de Boltzmann et T la température absolue.

Cette formule représente le premier exemple historique de relation de fluctuation-dissipation et illustre le rôle central des fluctuations en physique statistique. Finalement, en exprimant k_B en termes de la constante R des gaz parfaits et du nombre d'Avogadro $N_A = R/k_B$, et



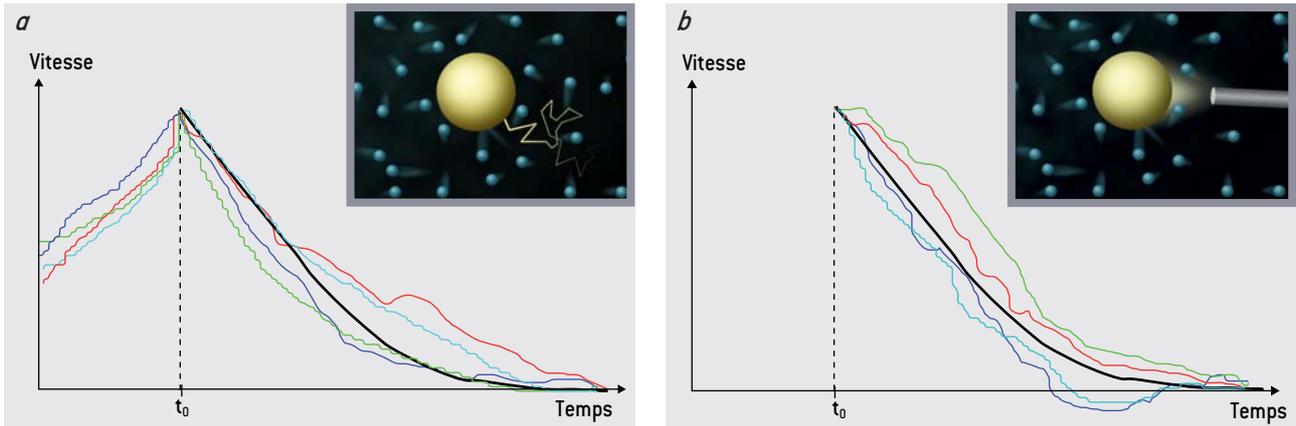
Une particule microscopique, mais grosse par rapport à la taille des molécules du fluide où elle baigne, subit les chocs aléatoires de ces molécules en proie à l'agitation thermique. De ce fait, la particule décrit une trajectoire erratique: c'est le mouvement brownien, découvert en 1827 par le botaniste écossais Robert Brown avec des particules issues de grains de pollen.

en utilisant la relation de Stokes entre la mobilité μ , la viscosité η du liquide et le rayon a de la particule brownienne, on obtient :

$$D = RT/(6\pi N_A \eta a).$$

Soulignons la subtilité de l'hypothèse sur laquelle ces résultats sont fondés, à savoir que la loi de Stokes (qui est de nature macroscopique) reste valable tout en ayant un équilibre statistique entre la particule et les molécules du liquide, malgré l'énorme différence de masse entre elles. L'importance de la relation obtenue ci-dessus vient du fait

qu'elle fournit une procédure pour déterminer le nombre d'Avogadro N_A , une quantité microscopique, à partir de quantités macroscopiques accessibles expérimentalement (D , T , R , etc.); cette relation fournit ainsi un lien sans ambiguïté entre les niveaux microscopique et macroscopique de la description. La particule brownienne, suffisamment grosse pour être visible au microscope (son diamètre est d'environ un micromètre), devient ainsi une sorte de loupe qui révèle la structure atomique de la matière.



3. LA VITESSE D'UNE PARTICULE MICROSCOPIQUE en suspension dans un fluide fluctue en permanence, en raison des chocs avec les molécules du fluide. Telle est l'origine du mouvement brownien. Si, sous l'effet d'une fluctuation spontanée, la vitesse de la particule atteint une certaine valeur maximale, sa décroissance (a) est, en moyenne, iden-

tique à celle de la variation de vitesse de la particule due à une brève perturbation extérieure et ayant atteint le même maximum (b). Les différentes couleurs indiquent différentes réalisations de la même expérience. Les courbes en noir correspondent à la moyenne sur un grand nombre de réalisations.

à-dire contenant quelques milliers de particules, telles les macromolécules auxquelles s'intéressent les biologistes.

Bien que leur exploration théorique et expérimentale ne soit pas achevée, les relations de fluctuation ont d'ores et déjà élargi notre compréhension de la physique de la matière. Il en est ainsi, par exemple, de la relation obtenue en 1997 par Christopher Jarzynski, au Laboratoire américain de Los Alamos. L'«égalité de Jarzynski», comme on la nomme, s'est révélée utile dans des expériences sur les molécules biologiques. Elle permet de déduire la différence d'«énergie libre» ΔF_{AB} entre deux états d'équilibre A et B d'un système donné à partir des différentes valeurs du travail effectué sur le système quand on réalise plusieurs fois la transformation de l'état A à l'état B.

Plusieurs équipes de chercheurs ont ainsi appliqué l'égalité de Jarzynski à l'étude du repliement, dans l'espace, des protéines ou d'autres macromolécules. La structure d'une macromolécule, qui détermine sa fonction biologique, peut changer quand son environnement change. La stabilité de la structure biologiquement appropriée dépend de la différence d'énergie libre avec d'autres structures concurrentes. Pour accéder aux valeurs d'énergie libre *via* l'égalité de Jarzynski, Carlos Bustamante et ses collègues, à Berkeley aux États-Unis, ont ainsi utilisé en 2002 des «micropinces optiques», formées à l'aide de lumière laser, pour tirer sur l'extrémité d'une molécule d'ARN (une très longue chaîne moléculaire emmêlée) dans sa structure initiale A pour lui conférer une autre structure B (voir la figure 3). On répète la même expérience

un grand nombre de fois, en enregistrant à chaque fois l'énergie fournie par les pinces optiques. Une simple analyse de l'histogramme des valeurs du travail fourni pour aller de l'état A à l'état B permet, grâce à l'égalité de Jarzynski, de déterminer la différence d'énergie libre ΔF_{AB} .

Les chercheurs ont pu généraliser le théorème de fluctuation-dissipation à des systèmes éloignés de l'équilibre, soit pour des états stationnaires (répétitifs dans le temps, par exemple certains écoulements turbulents, ou une boîte contenant du sable fortement secouée), soit pour des systèmes à relaxation lente (gels, pâtes, colloïdes, matériaux vitreux). Ces derniers sont des états de la matière imparfaitement compris, où l'on ne dispose pas d'une définition microscopique de la température qui fasse l'unanimité. Les efforts

Un outil pour étudier le repliement des macromolécules

Les valeurs de l'énergie libre F caractérisent les états d'équilibre d'un système compte tenu de sa température; en particulier, des valeurs basses de F correspondent à des états plus stables. Comme l'énergie libre est une grandeur qui dépend de l'état d'équilibre thermodynamique, l'égalité de Jarzynski permet d'obtenir de l'information sur les états d'équilibre à partir d'expériences effectuées hors d'équilibre; c'est à l'inverse du théorème de fluctuation-dissipation, qui fournit de l'information sur les phénomènes hors d'équilibre à partir d'observations réalisées à l'équilibre.

Chaleur spécifique et fluctuations de l'énergie

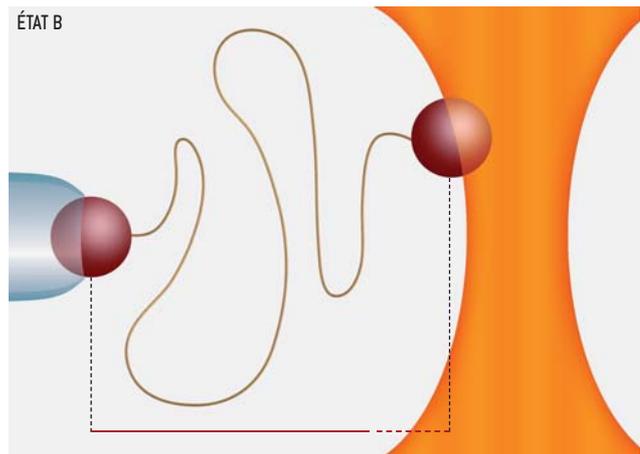
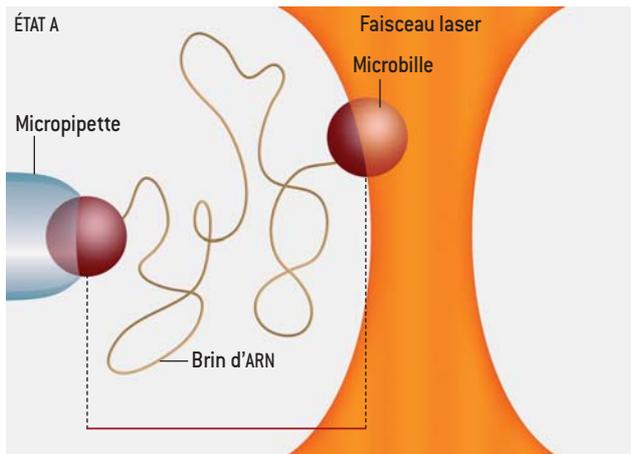
Dans un système à l'équilibre thermodynamique composé de N particules, on démontre que les fluctuations de l'énergie totale E sont reliées à la chaleur spécifique c_v , qui est la quantité de chaleur (par particule) nécessaire pour augmenter la température de un degré centigrade. Cette relation s'écrit :

$$\langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = k_B T^2 N c_v,$$

où la notation $\langle \rangle$ indique la moyenne statistique (par exemple, $\langle E \rangle$ est l'énergie moyenne du système), T est la

température absolue et k_B est la constante de Boltzmann. La chaleur spécifique est une fonction de réponse particulière, puisqu'elle spécifie comment l'énergie moyenne du système varie quand on modifie la température (par définition, $c_v = 1/N d\langle E \rangle / dT$). Einstein a souligné la pertinence conceptuelle de l'équation ci-dessus en notant qu'elle « donnerait une détermination exacte de la constante universelle (le nombre d'Avogadro N_A) s'il était possible de déterminer

le carré des fluctuations d'énergie du système ». Une caractéristique importante de la relation de fluctuation-dissipation, manifeste dans cette équation, est son rôle de « loupe » pour les fluctuations. En effet, malgré leurs très petites valeurs dans les systèmes macroscopiques ordinaires, les fluctuations peuvent être mesurées indirectement, par le biais de la relation de fluctuation-dissipation, en appliquant une perturbation aux systèmes étudiés.



4. L'ÉGALITÉ DE JARZYNSKI est une relation de fluctuation-dissipation qui permet d'obtenir la différence ΔF_{AB} d'énergie libre (une grandeur thermodynamique) entre deux structures stables A et B d'une macromolécule en mesurant le travail fourni pour passer de l'état A à l'état B. Une telle expérience a consisté à étirer un brin d'ARN au moyen de microbilles attachées chimiquement aux extrémités de la chaîne moléculaire. L'une des microbilles est maintenue fixe à l'aide d'une micropipette

pendant que l'autre est déplacée à l'aide de « pinces optiques », formées par un faisceau laser qui piège la microbille. En écartant ses deux extrémités, on amène la molécule d'un état plié A à un état déplié B. L'expérience est répétée un grand nombre de fois, en enregistrant à chaque fois le travail effectué par la pince optique. L'égalité de Jarzynski permet, en calculant une moyenne sur ces différentes valeurs du travail, d'évaluer la différence d'énergie libre ΔF_{AB} .

✓ SUR LE WEB

N. Pottier, Cours de DEA sur la physique statistique hors d'équilibre, 2000 : <http://cel.ccsd.cnrs.fr/cel-00092930>

Ph.-A. Martin, Cours de DEA sur la physique statistique des processus irréversibles, 2004 : <http://cel.ccsd.cnrs.fr/cel-00092959>

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Esposito *et al.*, Nonequilibrium fluctuations, fluctuation theorems and counting statistics in quantum systems, *Review of Modern Physics*, vol. 81, pp. 1665-1702, oct.-déc. 2009.

U. Marini Bettolo Marconi *et al.*, Fluctuation-dissipation : Response theory in statistical physics, *Physics Reports*, vol. 461, pp. 111-195, 2008.

N. Pottier, Physique statistique hors d'équilibre - Processus irréversibles linéaires, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2007.

C. Bustamante *et al.*, The nonequilibrium thermodynamics of small systems, *Physics Today*, vol. 58, pp. 43-48, 2005.

A. Einstein, Investigation on the Theory of the Brownian Motion, Dover, 1956.

pour généraliser le théorème de fluctuation-dissipation à ces systèmes ont conduit à la définition de « températures dynamiques », dont la signification reste débattue, mais qui pourraient donner lieu à un nouveau type de « thermomètres » pour physiciens, fondés sur une mesure de fluctuation-dissipation.

Il y a environ 35 ans, les Américains Cecil Leith et Robert Kraichnan ont suggéré d'utiliser le théorème de fluctuation-dissipation pour comprendre le climat et l'influence d'un brusque changement de paramètres, telle la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone, dû par exemple aux activités humaines ou volcaniques. Cependant, le système climatique a des caractéristiques qui font que l'application du théorème de fluctuation-dissipation est loin d'être triviale. D'une part, de nombreux temps caractéristiques différents (de quelques secondes à des milliers d'années) interviennent dans le climat. D'autre part, les lois qui régissent l'évolution temporelle du système climatique ne sont pas très bien connues.

Des applications à la climatologie ?

L'extrême complexité de la dynamique du système climatique ne constitue pas un obstacle conceptuel à l'utilisation des relations entre fluctuations et dissipation, mais elle pose des défis d'ordre technique. Par exemple, l'amortissement d'une gran-

deur donnée dépend de l'amplitude de la perturbation initiale à laquelle cette grandeur a été soumise. De petites perturbations sont susceptibles de s'amortir rapidement, alors que de fortes perturbations risquent de s'amortir plus lentement. Un tel comportement découle de la présence de nombreux degrés de liberté et de temps caractéristiques très divers (par exemple, les temps caractéristiques des perturbations de petite échelle sont de l'ordre de quelques secondes, tandis que ceux des courants océaniques profonds sont de l'ordre de quelques millénaires).

Cependant, la principale idée sous-jacente au théorème de fluctuation-dissipation, à savoir que les effets des perturbations externes sont équivalents aux fluctuations spontanées, conduit à une sérieuse difficulté dans le cas du climat : la compréhension des effets de fortes perturbations nécessite la connaissance de fluctuations rares, dont les statistiques sont nécessairement entachées de grandes incertitudes.

Ainsi, malgré les difficultés techniques, il existe de nombreux systèmes dont la compréhension peut bénéficier d'une forme ou d'une autre du théorème de fluctuation-dissipation, qui est un ingrédient central de la physique statistique des systèmes hors d'équilibre. Les recherches dans ce domaine se poursuivent activement, notamment pour généraliser les relations de fluctuation-dissipation aux systèmes chaotiques ou aux systèmes quantiques. ■