

de type (a) la probabilité $p_1 = 1/\Omega_1$, et nos prévisions ultérieures se font à partir de là.

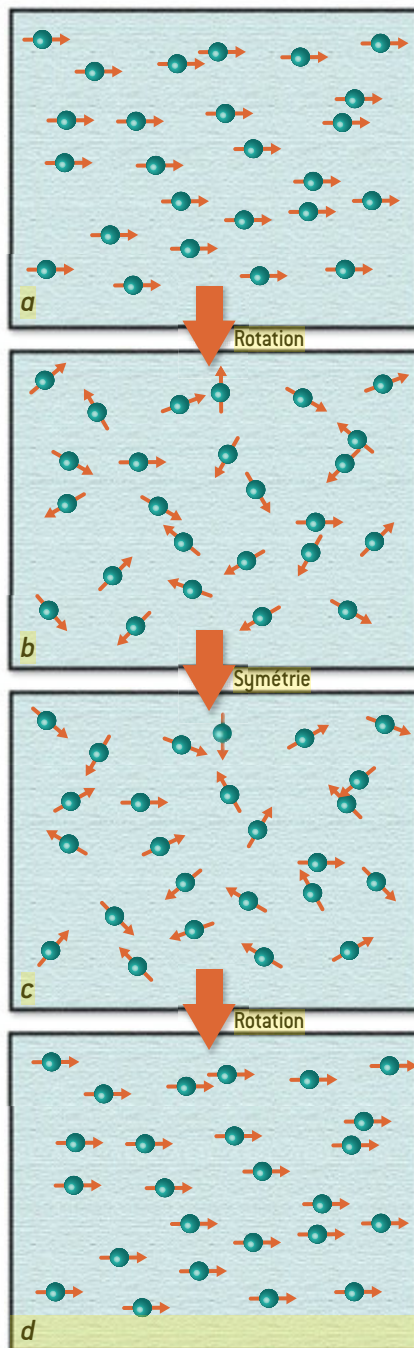
La théorie de l'information, créée en 1948 par le mathématicien américain Claude Shannon, permet de mesurer notre incertitude, c'est-à-dire la quantité d'information qui nous manque en raison du caractère probabiliste de la description ; cette quantité est proportionnelle au logarithme de la probabilité. On a pu alors montrer que l'entropie S introduite en thermodynamique s'interprète (à une constante multiplicative près) comme une mesure de notre incertitude à l'échelle microscopique lorsque notre connaissance du système se limite à ses grandeurs macroscopiques, ou encore comme notre perception du désordre.

Par exemple, l'entropie S_1 de l'état où le gaz occupe le volume A s'identifie à $S_1 = k_B \ln \Omega_1$, où $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin est la constante de Boltzmann ; cette formule, qui a clarifié la signification de l'entropie, est si remarquable qu'on l'a gravée sur la tombe de Boltzmann, à Vienne. Lorsque le gaz se répand dans le volume $A + B$, notre incertitude augmente puisque les positions des molécules sont encore moins bien précisées ; l'accroissement $k_B (\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = N k_B \ln 2$ de l'entropie mesure l'augmentation de notre incertitude. C'est en ce sens que le deuxième principe de la thermodynamique exprime la croissance du désordre.

L'observateur à son rôle

Dans l'expérience de pensée sur le gaz qui se répand dans le volume $A + B$, l'irréversibilité de l'expansion, alors que les équations microscopiques du mouvement sont réversibles, est liée à notre incapacité à renverser exactement les vitesses de toutes les molécules. Cependant, depuis les travaux de l'Américain Erwin Hahn, vers 1950, les expérimentateurs savent réaliser une opération analogue sur des systèmes particuliers, les substances paramagnétiques (voir la figure 3). Celles-ci comportent des moments magnétiques élémentaires, ou spins, qui, lorsqu'on applique un champ magnétique extérieur horizontal, s'alignent dans la direction de ce champ ; le matériau est alors aimanté, situation ordonnée analogue à l'état initial de notre gaz.

La suppression brusque de ce champ laisse les spins libres de tourner indépendamment, chacun avec une vitesse bien



3. LES « ÉCHOS DE SPIN » sont l'un des rares cas où l'on est capable d'inverser l'évolution spontanée d'un système. L'état initial d'un échantillon de matériau paramagnétique, aimanté dans la direction horizontale du plan (a), est préparé en appliquant à l'échantillon un champ magnétique dans cette direction, qui oriente tous les spins. La suppression de ce champ laisse les spins tourner dans le plan, chacun avec une vitesse propre (sous l'effet d'un champ non homogène perpendiculaire au plan de la figure). L'aimantation a ainsi disparu au bout d'un temps T (b). Une brève impulsion électromagnétique, bien choisie, effectue alors une symétrie par rapport à l'axe horizontal de tous les spins (c). Les rotations inégales des spins les ramènent à l'instant $2T$ dans leur état initial (d).

définie qui dépend de sa position en raison de l'hétérogénéité du milieu ; la désorientation relative des spins se traduit à notre échelle par une désaimantation progressive, un processus irréversible analogue à l'expansion de notre gaz. Au bout d'une durée T , les spins pointent dans des directions qui semblent quelconques, avec une apparence de désordre.

Remarquablement, en appliquant à l'échantillon une brève impulsion de champ magnétique convenablement choisie, les expérimentateurs sont capables d'effectuer globalement sur tous les spins une symétrie par rapport à l'axe horizontal, réalisant ainsi une opération analogue au renversement hypothétique des vitesses des molécules du gaz. La rotation spontanée des spins, chacun avec sa vitesse propre, se poursuit et les ramène alors tous au bout du délai T dans leur orientation initiale : l'échantillon s'est réaimanté malgré l'absence du champ horizontal externe. On a ainsi produit un « écho de spin » : le système est revenu à son état initial comme s'il avait remonté le temps. En fait, l'observateur savait que l'état désaimanté présentait un ordre caché, car il était issu de l'état aimanté, et il a réussi à tirer parti de cette information. Les échos de spin sont devenus une technique courante en imagerie par résonance magnétique.

Une idée similaire est exploitée en acoustique par Mathias Fink et son équipe à l'ESPCI (École supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris). La diffusion par un objet complexe d'ondes ultrasonores originellement émises par une source simple est un processus à première vue irréversible, car les ondes diffusées ont une apparence aléatoire. Imaginons cependant que l'on entoure l'objet diffuseur de capteurs pouvant détecter et enregistrer les signaux reçus, puis émettre une onde identique mais variant en sens inverse dans le temps, les premières oscillations émises reproduisant les dernières reçues. Cela permet d'effectuer un « retournement temporel » des ondes ultrasonores, qui convergent alors vers l'objet en reproduisant à l'envers les ondes divergentes originales.

Une telle focalisation, produite en dépit de l'hétérogénéité du milieu diffuseur, est à la base de techniques innovantes notamment pour briser des calculs rénaux ou pour détecter des tumeurs. Voilà un exemple remarquable d'application d'un renversement de la flèche du temps !