

diminuer l'entropie du gaz en opérant un tri intelligent, tout en dépensant une quantité négligeable d'énergie.

Un démon voleur d'entropie

Près de 60 ans plus tard, en 1929, Leó Szilárd, physicien hongaro-américain, a résolu ce paradoxe. Selon lui, afin de prendre la décision d'ouvrir ou de fermer la porte, le démon de Maxwell doit recueillir de l'information. Laquelle information, précisait-il, est porteuse d'entropie. Ainsi, la diminution d'entropie du gaz est exactement compensée par l'entropie prélevée par le démon sous forme d'information : le deuxième principe de la thermodyna-

mique est sauf. Cette intuition place Szilárd en avance sur son temps : l'idée selon laquelle l'information a une réelle signification physique, et qu'elle est étroitement liée à l'entropie, est en partie à l'origine des sciences de l'information.

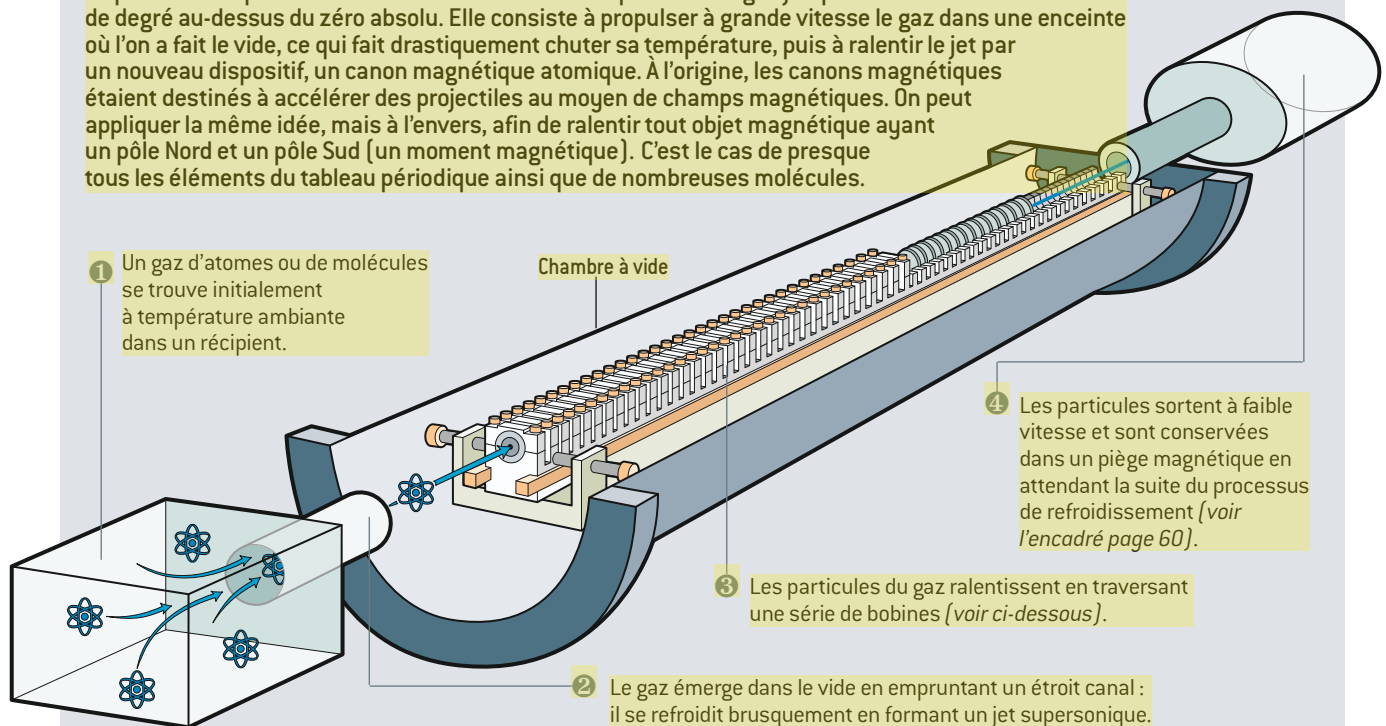
Les réflexions autour du paradoxe de Maxwell et de la solution proposée par Szilárd sont restées pendant de nombreuses années des spéculations purement théoriques. Mes collègues et moi avons été les premiers à réaliser expérimentalement l'expérience de pensée de Maxwell de la façon dont il la concevait, et à montrer en quoi l'intuition de Szilárd, selon laquelle l'information joue un rôle crucial, était correcte. Mentionnons toutefois qu'il y a eu d'autres expériences

récentes fondées sur les mêmes ressorts conceptuels, en utilisant plutôt des nanomachines. Grâce à nos portes à gaz, nous sommes parvenus à refroidir des atomes jusqu'à des températures de 15 millièmes de kelvin.

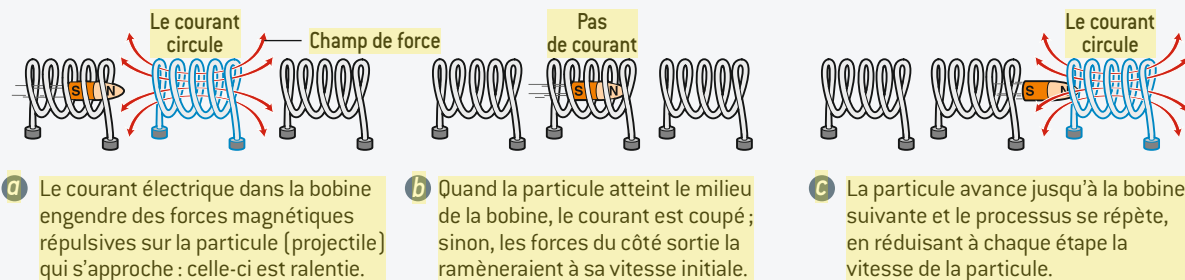
Pour qu'une porte à sens unique fonctionne, j'ai compris que les atomes du gaz devaient avoir deux états différents, deux configurations stables des électrons en orbite. Considérons un gaz d'atomes dans deux états, dénommés bleu et rouge. Les atomes se déplacent dans un récipient traversé en son milieu par un faisceau laser, réglé sur une longueur d'onde bien particulière. Quand ils s'approchent du faisceau, les atomes rouges rebondissent : ils trouvent porte close.

PREMIÈRE ÉTAPE : DES FREINS MAGNÉTIQUES

La première étape de refroidissement abaisse la température du gaz jusqu'à environ un centième de degré au-dessus du zéro absolu. Elle consiste à propulser à grande vitesse le gaz dans une enceinte où l'on a fait le vide, ce qui fait drastiquement chuter sa température, puis à ralentir le jet par un nouveau dispositif, un canon magnétique atomique. À l'origine, les canons magnétiques étaient destinés à accélérer des projectiles au moyen de champs magnétiques. On peut appliquer la même idée, mais à l'envers, afin de ralentir tout objet magnétique ayant un pôle Nord et un pôle Sud (un moment magnétique). C'est le cas de presque tous les éléments du tableau périodique ainsi que de nombreuses molécules.



Comment le canon magnétique fonctionne



Au départ, tous les atomes sont bleus, et peuvent passer sans encombre la porte laser. Une fois la porte franchie, les atomes désormais situés à sa droite rencontrent un second faisceau laser, réglé pour transformer les atomes bleus en atomes rouges par diffusion d'un unique photon. Les atomes, devenus rouges, sont dorénavant repoussés par le premier faisceau laser, et ne peuvent plus traverser la porte dans l'autre sens. À la fin, tous les atomes, rouges, se retrouvent du côté droit, le côté gauche étant vide.

Nous avons ainsi refroidi des atomes de rubidium lors d'une première démonstration de notre porte, début 2008. Nous avons qualifié de «refroidissement à un seul photon» cette méthode, pour la distinguer des premières techniques de refroidissement laser où de nombreux photons interviennent pour refroidir chaque atome.

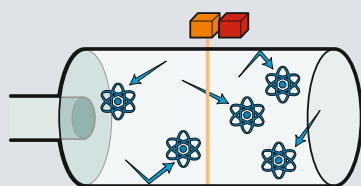
Au même moment, Gonzalo Muga, de l'Université de Bilbao, et son collaborateur Andreas Ruschhaupt (maintenant à l'Université Leibniz de Hanovre, en Allemagne) développaient un concept simi-

laire. Nous avons d'ailleurs travaillé tous les trois ensemble afin d'éclaircir certains aspects théoriques du fonctionnement de la porte.

Nous avons montré en 2006 que lorsqu'un photon est diffusé par un atome (lors de la transition de l'état bleu à l'état rouge), ce photon emporte de l'information relative à l'atome : cette information correspond, selon l'hypothèse de Szilárd, à une minuscule quantité d'entropie. Alors que le photon incident, qui excite l'atome, est issu d'un train ordonné de photons – le faisceau laser –, le photon diffusé se propage dans une direction aléatoire : les photons deviennent donc plus désordonnés.

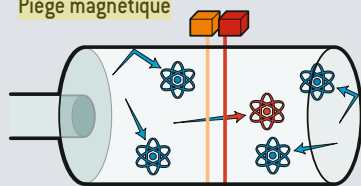
SECONDE ÉTAPE : UN FROID DÉMONIAQUE

Une fois le gaz refroidi à quelques centièmes de degré au-dessus du zéro absolu par un canon magnétique (ou par un autre dispositif), un processus de refroidissement plus poussé doit prendre le relais, afin de faire descendre la température à quelques millièmes de kelvin, voire moins. Le refroidissement à un seul photon réalise cet exploit grâce à une porte à sens unique, inspirée d'une expérience de pensée du XIX^e siècle, le démon de Maxwell. L'idée est d'abord de concentrer, à l'aide de la porte, les atomes dans un plus petit volume (sans augmenter leur température), puis de leur redonner accès au volume initial (ce qui abaisse la température).

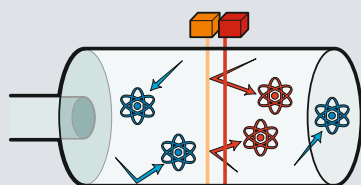


Piège magnétique

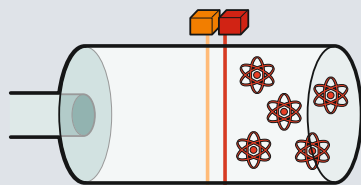
1 Des atomes dans un état initial donné (en bleu) sont retenus dans un piège magnétique. On allume alors un laser (en orange) qui n'agit que sur les atomes situés dans leur second état stable.



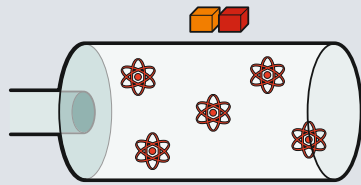
2 Un second faisceau laser (en rouge) fait basculer les atomes qui le croisent, de leur état bleu vers leur second état stable (atome rouge).



3 Les atomes dans l'état rouge rebondissent dorénavant quand ils rencontrent le laser orange : ils sont contraints de rester du côté droit du piège.



4 Tous les atomes finissent par traverser le second laser : ils deviennent rouges et restent bloqués du côté droit. Ils sont à la même température qu'au départ, mais dans un volume plus petit.



5 On éteint les deux lasers, le gaz d'atomes reprend alors son volume initial. En se dilatant, il se refroidit.

L'entropie est dans les photons

Nous avons montré que l'augmentation d'entropie, liée au désordre croissant des photons, compense exactement la diminution d'entropie des atomes confinés grâce à la porte à sens unique. Ainsi, le refroidissement à un seul photon fonctionne comme un démon de Maxwell, dans le sens précis où l'entendait Szilárd en 1929. Notre démon est simple et efficace : c'est un faisceau laser dont l'opération de tri se fonde sur un phénomène irréversible, la diffusion d'un photon unique. Ce n'est ni un être intelligent ni un ordinateur. Il ne prend pas *stricto sensu* des décisions fondées sur l'information portée par les atomes : il suffit que cette information soit disponible et qu'elle puisse en principe être recueillie.

Le contrôle du mouvement des atomes et des molécules ouvre de nouvelles pistes scientifiques. Les chimistes vont pouvoir piéger et refroidir des molécules afin d'étudier les réactions chimiques dans le régime quantique. N'importe quelle molécule dotée d'un moment magnétique peut être ralentie par le canon magnétique, qui complète utilement une autre méthode similaire, utilisant des forces électriques pour freiner une molécule polarisée électriquement.

Pour des molécules assez petites, le refroidissement à un seul photon pourrait abaisser la température suffisamment pour observer des phénomènes quantiques. Par exemple, les ondes quantiques associées aux molécules s'étireraient assez pour que des molécules éloignées les unes des autres réagissent, et cela sans qu'on ait à fournir l'énergie cinétique