

LOGIQUE & CALCUL

Vers du calcul sans coût énergétique

De nouvelles expériences sur de petits calculs confirment qu'un minimum d'énergie est nécessaire pour les effectuer. Mais la maîtrise du calcul réversible pourrait rendre caduc cet obstacle thermodynamique.

Jean-Paul DELAHAYE

L'information est-elle un concept physique comme l'énergie ou la masse, ou un concept purement mathématique qui n'a de sens que pour des êtres doués d'intelligence et qui n'intervient directement dans aucune loi proprement physique ?

En thermodynamique, on se pose cette question depuis longtemps et plus particulièrement depuis que l'on a noté des similarités entre la notion d'entropie physique,

née au XIX^e siècle avec Rudolf Clausius, et la notion d'entropie mathématique, dont la théorie de l'information de Claude Shannon a proposé une première version, complétée par Andreï Kolmogorov.

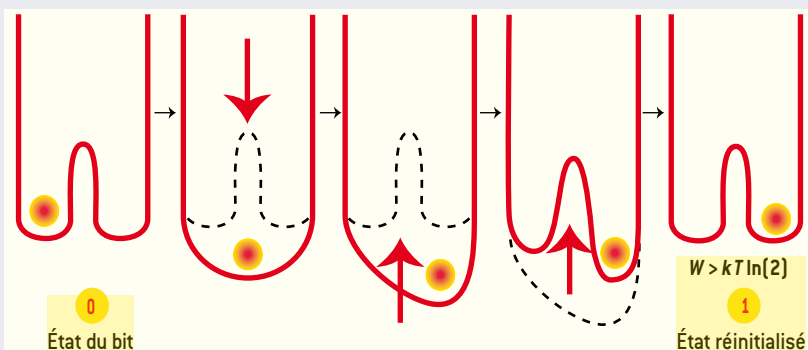
La question est directement liée à celle du coût minimal des opérations de calcul, qui détermine le devenir à long terme de tous nos dispositifs informatiques. Mais elle est aussi importante sur un plan philosophique, pour savoir si la physique doit devenir une

théorie matérielle de l'information. Où en sommes-nous aujourd'hui sur ces questions ?

Nos microprocesseurs chauffent, ce qui est devenu un problème avec la miniaturisation des circuits. Plus précise que la « loi de Moore » qui prédit un doublement de la puissance de calcul des puces informatiques tous les 18 mois, la « loi de Koomey » indique que, grâce à la miniaturisation, le nombre d'opérations de calcul par joule dépensé double tous les 18 mois environ. L'étude des chiffres

Le principe de Landauer testé avec succès

Le principe de Landauer énonce que lorsqu'une opération logique irréversible est menée, par exemple effacer une information dans une mémoire d'ordinateur, alors une certaine énergie est inévitablement dépensée ; à l'issue de l'opération, elle se retrouve sous forme de chaleur dans l'environnement du dispositif. Ce principe est discuté depuis 1961. C'est seulement depuis 2012 que l'on a réussi à mener des expériences suffisamment précises pour le tester (voir les quatre références de la bibliographie signalées par un astérisque).



La plupart des expériences consistent à créer une mémoire de un bit en piégeant une particule dans un double puits de potentiel (trait rouge). Selon que la particule est dans le premier puits ou le second, un 0 ou un 1 est mémorisé. Si la particule est en 0, on peut de façon réversible (donc sans coût en énergie) la déplacer en 1. De même, si elle est en 1, la laisser en 1 n'a aucun coût. En revanche, si l'on veut que, quelle que soit sa position initiale (pas forcément connue), elle se retrouve en 1 (réinitialisation), alors le processus (ci-contre) exige un minimum d'énergie. Quatre expériences concluant en faveur du principe de Landauer ont été menées depuis 2012 : à chaque fois, en s'y prenant au mieux, la réinitialisation exige un minimum d'énergie qui correspond à celui donné par le principe de Landauer ($kT \ln(2)$, T étant la température absolue et k la constante de Boltzmann).

montre avec une étonnante précision que depuis 1950, le doublement énoncé par l'Américain Jonathan Koomey s'est produit tous les 1,57 ans. Pour maintenir la vitesse de croissance de la puissance de calcul, il faudra évacuer de mieux en mieux une quantité de chaleur émise par des surfaces de plus en plus petites. Résoudre le problème force à envisager la fabrication de puces en 3D qui limitent les distances à parcourir par les courants électriques et donc l'échauffement provoqué par effet Joule. Une autre solution, nous le verrons, est de concevoir des puces réversibles.

Effacer un bit coûte un minimum d'énergie

Savoir s'il existe un minimum à l'énergie nécessaire pour effectuer des calculs est d'un intérêt pratique indubitable. Selon une hypothèse formulée en 1961 par le physicien américain Rolf Landauer [1927-1999], toute opération irréversible de calcul entraîne une dissipation de chaleur dans l'environnement. Calculer oblige à dépenser de l'énergie et produit un échauffement minimal. Ce n'est

guère étonnant et cela est conforme à la pratique. De la limite théorique de Landauer, on déduit que si nous continuons à fabriquer des puces irréversibles, la loi de Koomey cessera définitivement d'être vraie et nous serons bloqués. La validité du principe de Landauer est donc cruciale.

Une étude expérimentale de la dépense d'énergie minimale lors d'une opération de réinitialisation d'un seul bit d'information utilisant des mémoires nanométriques magnétiques a été menée en 2016 par Jeong-min Hong, de l'université de Californie à Berkeley, Brian Lambson, de la société Haynes & Boone à Palo Alto, et Jeffrey Bokor, du laboratoire américain Lawrence Berkeley. Cette technologie de stockage d'information étant aujourd'hui proche de celles couramment utilisées en informatique, les résultats obtenus concernent directement nos ordinateurs. Les chercheurs ont observé que la quantité d'énergie dissipée dans ce processus est conforme à la limite prévue par Landauer.

Partant d'une mémoire magnétique de un bit d'information dans un état 0 ou 1, une séquence d'applications de champs magnétiques remet la mémoire dans l'état 1.

Pour ces opérations, on utilise l'effet magnéto-optique Kerr, qui est un moyen de mémoriser des bits d'information en faisant interagir une intense onde électromagnétique, par exemple lumineuse, avec un matériau ferromagnétique. Après application de l'onde intense, la polarisation d'une onde envoyée sur le matériau et réfléchi est changée, ce qui inscrit une information binaire dans le matériau. Pour mesurer la quantité de chaleur diffusée, les chercheurs n'ont pas utilisé un seul point de stockage, mais un réseau de points identiques. Chaque point avait un diamètre de 0,1 micromètre, et était séparé de ses voisins de 0,4 micromètre. L'expérience, réalisée à diverses températures, a dégagé une quantité de chaleur un peu supérieure, mais proche de celle prévue par le principe de Landauer.

Aujourd'hui, les circuits microélectroniques les plus économes dépensent environ mille fois plus d'énergie que le minimum infranchissable indiqué par le principe de Landauer. Si les progrès continuent de suivre la loi de Koomey, nous y serons donc dans moins de 20 ans (voir la figure ci-dessous).

On s'approche de la barrière de Landauer

Le graphique ci-contre montre l'évolution récente de la consommation électrique pour une opération de calcul irréversible dans les circuits CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). L'unité 1 sur l'axe des ordonnées représente la consommation en 2012.

On voit sur le graphique que la courbe décroît linéairement (cela correspond à la loi de Koomey, qui stipule que le nombre d'opérations de calcul par joule dépensé double tous les 18 mois environ). Si cette progression régulière se poursuit, la courbe coupera la ligne horizontale pointillée – la barrière de Rolf Landauer – dans environ 20 ans. Puisque cette limite semble aujourd'hui infranchissable, la progression changera probablement d'allure: la courbe de consommation va se redresser et rester légèrement au-dessus de la ligne pointillée. Les données du graphique proviennent de R. Drechsler et R. Wille, « Reversible circuits: Recent accomplishments and future challenges for an emerging technology », dans H. Rahaman et al. (sous la dir.), *Progress in VLSI Design and Test*, Springer, pp. 383-392, 2012.

