

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.

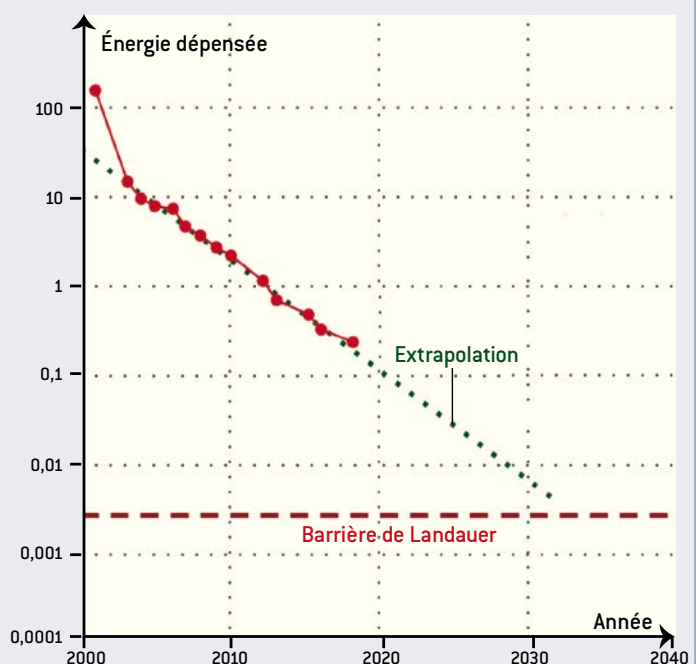
Pour ces opérations, on utilise l'effet magnéto-optique Kerr, qui est un moyen de mémoriser des bits d'information en faisant interagir une intense onde électromagnétique, par exemple lumineuse, avec un matériau ferromagnétique. Après application de l'onde intense, la polarisation d'une onde envoyée 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.



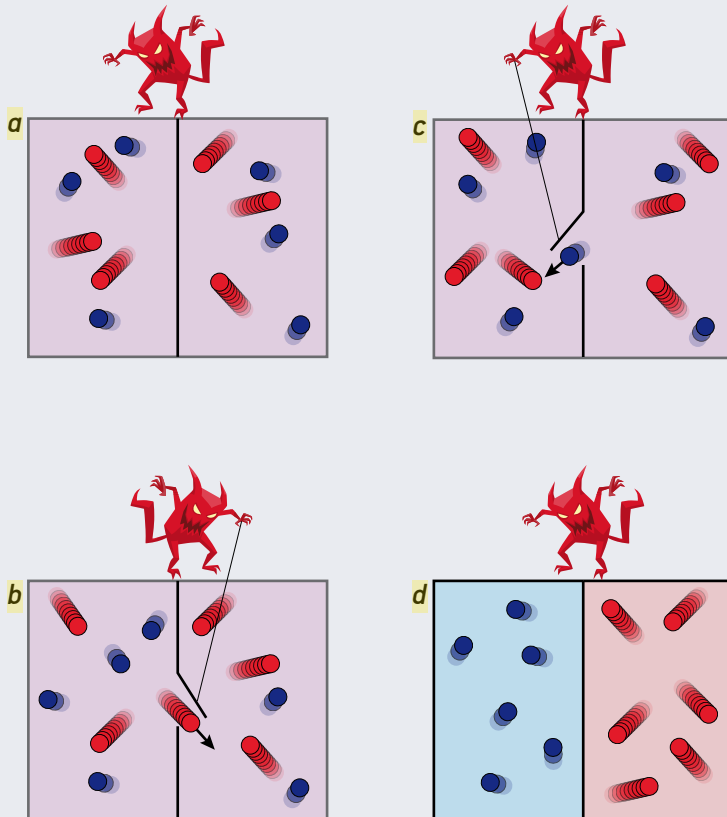
Le démon de Maxwell

Le principe de Landauer formulé en 1961 affirme qu'il existe un lien étroit entre la théorie de l'information et la thermodynamique. Il indique que l'effacement d'information ou toute opération élémentaire logique irréversible entraîne inévitablement une dissipation de chaleur au moins égale à $kT \ln(2)$ (k étant la constante de Boltzmann, T la température absolue).

Charles Bennett a utilisé ce principe pour résoudre le paradoxe du « démon de Maxwell ». Dans cette expérience de pensée, le démon observe les mouvements des molécules (a) et manipule une porte sans masse fonctionnant sans frottement entre deux compartiments d'un même réservoir, initialement à température uniforme. En ouvrant au bon moment la porte (b, c), il fait passer une à une les molécules les plus rapides du gaz (les molécules « chaudes », en rouge) d'un même côté, et les plus lentes (les molécules « froides », en bleu) de l'autre. Un compartiment devient alors plus chaud (d) que l'autre, puisqu'ils

contiennent les molécules les plus agitées. Cela semble contredire le second principe de la thermodynamique, puisqu'alors la différence de température entre les deux compartiments permettrait d'effectuer un travail.

La solution de Charles Bennett à ce paradoxe est qu'en décrivant le système, il faut prendre en compte la mémoire du démon. Celle-ci a dû être réinitialisée à chaque passage de molécule pour se retrouver dans son état initial, réinitialisation qui a un coût énergétique. Les expériences récentes valident cette solution du paradoxe.



Revenons sur le principe de Landauer longtemps controversé. Landauer a stipulé que l'irréversibilité logique est associée à l'irréversibilité physique et a émis l'hypothèse que l'effacement de l'information est un processus nécessairement dissipatif : oublier a un coût, et ce coût est impossible à éliminer. L'irréversibilité logique est l'impossibilité de revenir en arrière lors d'un calcul numérique ou logique. Par exemple, si l'on calcule le ET entre deux variables logiques A et B pouvant prendre les valeurs v (pour vrai) et f (pour faux), on a $v \text{ ET } v = v$, $v \text{ ET } f = f$, $f \text{ ET } v = f$, $f \text{ ET } f = f$. Il résulte que si l'on sait que le résultat de $\{A \text{ ET } B\}$ est f , on ne pourra pas retrouver A et B , qui pourraient être $\{A = v \text{ et } B = f\}$, $\{A = f \text{ et } B = v\}$ ou $\{A = f \text{ et } B = f\}$. Le calcul du ET est logiquement irréversible. Le OU est aussi logiquement irréversible, alors que le NON est réversible : la connaissance de $\text{NON } A$ donne A , car $\text{NON}(\text{NON } A) = A$.

Une barrière liée à l'irréversibilité

Landauer a affirmé que, lors d'une opération irréversible sur un bit d'information menée au sein d'un dispositif de mémoire plongé dans un environnement à une température absolue donnée T , au moins $kT \ln(2)$ joules de chaleur sont dissipés de la mémoire vers l'environnement (soit 3×10^{-21} joule à 300 kelvins ou 27 °C, la température ambiante). Dans cette formule, k est la constante de Boltzmann et $\ln(2)$ est le logarithme népérien de 2.

Aujourd'hui, dans la pratique, la barrière de Landauer n'est pas la principale raison de l'échauffement de nos puces et bien d'autres économies sont à mettre en œuvre avant de s'en préoccuper. Mais la science doit prévoir...

Notons que les expériences où l'on rencontre physiquement cette barrière de dissipation ne constituent pas des preuves définitives du principe de Landauer, car ne pas réussir à franchir une barrière ne prouve pas qu'elle soit infranchissable. De même qu'on ne démontrera pas qu'un objet matériel ne peut pas aller plus vite que la lumière en constatant qu'on n'y parvient pas, il sera impossible de prouver expérimentalement et définitivement le principe de Landauer.