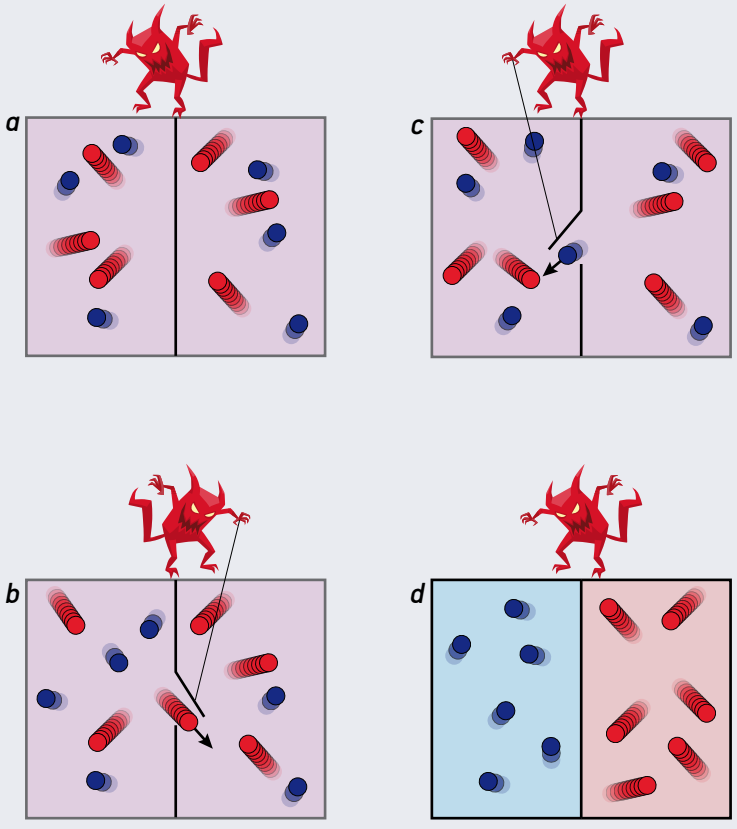
Le démon de Maxwell

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 contient 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 ET $v = v$, v ET $f = f$, f ET $v = f$, f ET $f = f$. Il résulte que si l'on sait que le résultat de (A ET B) est f, on ne pourra pas retrouver A et B, qui pourraient être $\{A = v$ et $B = f\}$, $\{A = f$ et $B = v\}$ ou $\{A = f$ 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 NON A donne A, car NON (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.

Cependant, quand on a réduit toutes les causes identifiées d'échauffement et que l'échauffement mesuré reste supérieur et proche de celui prédit par le principe de Landauer, on ne peut que lui accorder plus de crédit.

L'expérience de 2016 confirme d'autres menées depuis quatre ans et qui toutes appuient le principe limitatif de Landauer.

Une microbille de verre et des lasers...

Le principe de Landauer a été testé pour la première fois en 2012 par Eric Lutz, de l'université d'Augsburg, en Allemagne, avec des collègues de l'École normale supérieure de Lyon (Antoine Bérut, Artak Arakelyan, Artyom Petrosyan, Sergio Ciliberto) et de l'université de Kaiserslautern (Raoul Dillenschneider). Leur dispositif, plus éloigné des dispositifs de calculs réels utilisés dans les microprocesseurs de l'expérience de 2016, consistait en une minuscule bille de verre plongée dans un liquide et qu'un faisceau laser piégeait dans un double puits de potentiel. Ce premier test avait été suivi par un autre en 2014 utilisant des particules plus petites. Une autre confirmation dans un cadre quantique a aussi été proposée en 2016 *(voir la bibliographie)*.

Les résultats de ces quatre expériences montrent qu'il est possible d'approcher par des dispositifs adaptés la limite de Landauer, et qu'on pourra donc aussi le faire dans les futurs systèmes de calcul : aucune autre source de dissipation, comparable ou supérieure en taille et qui n'aurait pas été identifiée par les théoriciens, ne vient semble-t-il s'ajouter au coût minimal prévu par le principe de Landauer. Nous savons que nous buterons sur un obstacle presque certain.

Cependant, lorsque nous serons plus proches de la limite de Landauer, nous disposerons d'un autre moyen de calculer plus rapidement sans faire trop chauffer nos puces : le calcul réversible. En effet, si l'on accepte le principe de Landauer, seuls les calculs irréversibles sont intrinsèquement coûteux ; il faut donc s'arranger pour faire des circuits réversibles. Est-ce possible ?

L'idée des calculs logiques réversibles est due au logicien et anthropologue français

Portes réversibles

La porte logique ET n'est pas réversible, car, si l'on connaît le bit du résultat de (*A* ET *B*), on ne peut pas reconstituer *A* et *B* *(en orange)*. Il en va de même de la porte logique OU *(en vert)*.

Mais en ajoutant deux bits de sortie à la table du ET, on obtient un ET réversible *(en bleu)*. La porte de Fredkin *(en violet)* est cependant plus pratique pour réaliser des circuits réversibles. Elle comporte trois bits en entrée. Le bit supplémentaire est un bit de « contrôle » : s'il vaut 0, les bits *A* et *B* restent identiques en sortie ; s'il vaut 1, les valeurs de *A* et *B* sont, en sortie, échangées.

On sait aujourd'hui concevoir des puces réversibles, ainsi que des langages de programmation ne produisant que des programmes réversibles. L'un des plus anciens est le langage Janus qui doit son nom au dieu romain à deux visages, un pour chaque sens.

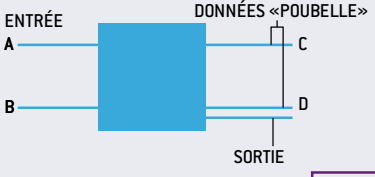
Porte ET

A	B	SORTIE
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Porte OU

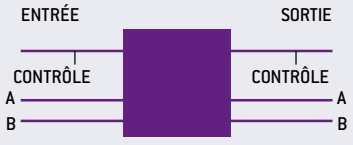
A	B	SORTIE
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Porte ET réversible



			POUBELLE	
A	B	SORTIE	C	D
1	1	1	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	0	1
0	0	0	0	0

Porte de Fredkin



ENTRÉE			SORTIE		
CONTRÔLE	A	B	CONTRÔLE	A	B
1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0