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.

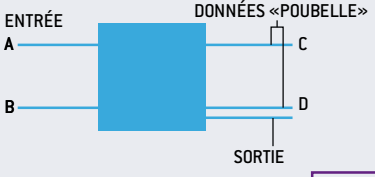
Porte ET

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

Porte OU

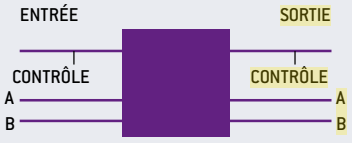
A	B	SORTIE
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

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

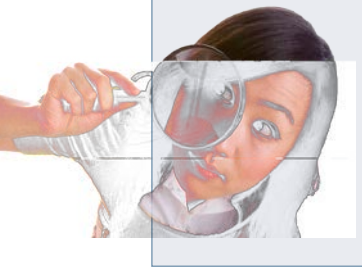


ENTRÉE			SORTIE		
CONTRÔLE	A	B	CONTRÔLE	A	B
1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0

Entropie et observation

L'entropie en thermodynamique est une grandeur associée à un macroétat, c'est-à-dire à un ensemble de configurations microscopiques (microétats) possibles pour un observateur qui ne connaît pas le détail des positions des molécules et leurs vitesses. L'entropie dépend par exemple de la température et du volume occupé par un gaz, informations insuffisantes pour déterminer la position et la vitesse de chaque molécule. L'entropie est une fonction croissante du nombre de microétats compatibles avec le macroétat.

En effectuant des mesures sur un système, un observateur diminue l'entropie, car ces mesures restreignent le nombre de microétats compatibles ; or cela semble contredire le second principe de la thermodynamique. Pour éviter cette contradiction, Wojciech Zurek, du laboratoire américain de Los Alamos, considère que lors d'une opération de mesure, il faut mener l'analyse de l'évolution de l'entropie en prenant en compte l'ensemble (système observé + observateur).



L'entropie du système observé est l'entropie classique en thermodynamique, et celle de l'observateur est l'entropie algorithmique de sa mémoire, définie par la taille du plus petit programme qui engendre les données de cette mémoire.

Lors d'une opération de mesure, l'entropie du système observé diminue, tandis que l'entropie algorithmique de la mémoire de l'observateur augmente. Les deux se compensent et le tout n'est donc pas sujet à une diminution d'entropie, conformément à ce qu'affirme le second principe, selon lequel l'entropie ne peut pas diminuer. Bien sûr, si ensuite l'observateur efface sa mémoire pour la rétablir dans son état initial d'avant l'observation, cela engendre d'après le principe de Landauer une augmentation de l'entropie de l'ensemble système-observateur-environnement. L'idée de Landauer et celle de Zurek produisent donc une conception cohérente de l'évolution de l'entropie lors d'une mesure conforme au second principe de la thermodynamique.

Yves Lecerf, disparu en 1995. En effet, ce dernier proposa en 1963 un modèle de machine de Turing (c'est-à-dire abstrait) réversible. Comme tout calcul peut être effectué avec une machine de Turing, lorsqu'on fait un calcul, quel qu'il soit, il existe une façon de le mener de manière logiquement réversible avec cette machine. Lorsque la machine réversible exécute son calcul en passant d'un état initial A à un état B, elle le fait de telle façon que, partant de B, on peut la faire fonctionner en arrière et revenir à A : rien n'a été oublié lors du calcul aller qui peut donc être « défait ».

Le résultat de Lecerf est fondamental et signifie qu'en s'y prenant bien et en gardant suffisamment d'informations sur le calcul pendant qu'il se déroule (grâce à des variables supplémentaires introduites à cette fin), on pourra reprendre le chemin inverse. Lecerf ignorait les travaux de Landauer et n'a pas poursuivi ses recherches sur le sujet. Son travail fondamental n'a été redécouvert que plus tard.

En 1973, Charles Bennett, chercheur chez IBM, montra que l'on pouvait concevoir des machines à calculer générales, à la fois logiquement réversibles (comme celles de Lecerf) et thermodynamiquement réversibles. Par conséquent, à chaque fois que l'on programme un calcul, il est possible en théorie de le réaliser physiquement de manière réversible. Si l'on accepte la validité du principe de Landauer, on pourra donc réaliser tout calcul à un coût énergétique aussi faible que souhaité.

En 1982, Edward Fredkin et Tommaso Toffoli, au MIT aux États-Unis, introduisirent un modèle de calculateurs n'utilisant que des boules de billard. Ce modèle théorique est physiquement réversible, mais il est inutilisable en pratique, puisqu'il faudrait pour le faire fonctionner réussir à placer et lancer un grand nombre de boules de billard de façon extrêmement précise, et d'autant plus précise que le calcul est long. Un autre modèle théorique d'ordinateur réversible, utilisant le mouvement brownien, fut proposé dans la foulée par Charles Bennett, mais là encore sans qu'il soit envisageable d'en fabriquer des versions utilisables... du moins pour l'instant *(voir http://www.nld.ds.mpg.de/~bioentropy/material/Bennett_1982.pdf)*.

Depuis, l'étude du calcul réversible a largement progressé et est devenue un sujet de recherche fondamentale. Un congrès annuel lui est consacré depuis une dizaine d'années, et plus personne ne doute qu'il faudra un jour passer par le calcul réversible pour que les performances des ordinateurs continuent à s'améliorer. Cette importance à venir du calcul réversible est d'autant plus probable que la mécanique quantique propose naturellement des modèles de calcul réversible. Si les ordinateurs quantiques doivent un jour remplacer nos ordinateurs classiques, alors le calcul réversible sera au centre des méthodes pour les concevoir et les programmer.

Informatique réversible : des recherches en cours

Mentionnons quelques thèmes de travaux.

a) Bien sûr, on perfectionne les modèles théoriques de machines réversibles dont on cherche à comprendre la complexité des opérations, que l'on compare aux opérations non réversibles. Mener des calculs réversibles oblige à gérer plus d'informations, et pour cela on peut s'y prendre plus ou moins bien. Charles Bennett avait démontré dès 1989 qu'une machine de Turing non réversible utilisant T étapes de calcul et S unités de mémoire peut être simulée par une machine de Turing réversible utilisant $T^{1+\epsilon}$ étapes de calcul et $S \log(T)$ mémoires, où ϵ est un nombre réel strictement