

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 ?

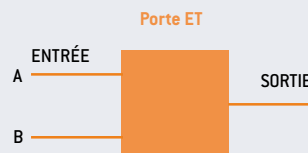
L'idée des calculs logiques réversibles est due au logicien et anthropologue français

Portes réversibles

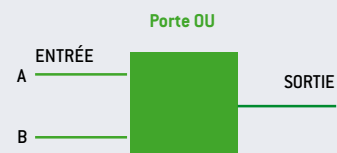
La porte logique ET n'est pas réversible, car, si l'on connaît le bit du résultat de $(A \text{ ET } B)$, on ne peut pas reconstituer A et B (en orange). Il en va de même de la porte logique OU (en vert).

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.

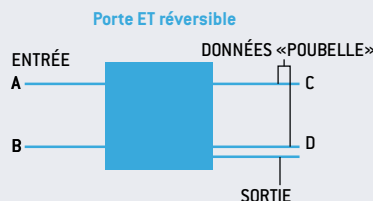
On sait aujourd'hui concevoir des puces réversibles, ainsi que des langages de programmation ne produisant que des programmes réversibles. L'un des plus anciens est le langage Janus qui doit son nom au dieu romain à deux visages, un pour chaque sens.



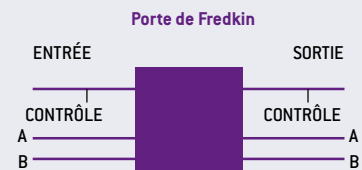
A	B	SORTIE
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0



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



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



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

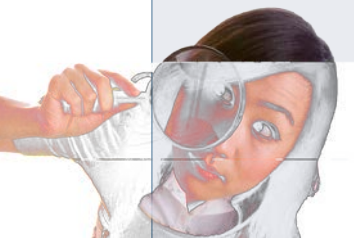
L'entropie en thermodynamique est une grandeur associée à un macroétat, c'est-à-dire à un ensemble de configurations microscopiques (microétats) possibles pour un observateur qui ne connaît pas le détail des positions des molécules et leurs vitesses. L'entropie dépend par exemple de la température et 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

positif que l'on peut choisir. Préciser et affiner les méthodes de transformation pour obtenir de telles machines réversibles pouvant se substituer aux machines non réversibles, en limitant le coût en temps et en mémoire, est bien évidemment essentiel pour que le calcul réversible soit utilisable avec efficacité.

b) La transformation automatique de programmes non réversibles en programmes réversibles est possible, mais ces transformations ne doivent pas être menées trop brutalement. Il y a sur ce thème une multitude de progrès à faire en considérant des méthodes adaptées à des classes particulières de programmes.

c) Pour faciliter l'écriture de programmes réversibles, on conçoit des langages de programmation de haut niveau avec des compilateurs associés qui produisent automatiquement des versions réversibles des programmes qu'on écrit. En particulier, on a développé des compilateurs de ce type pour le langage C. Un langage dénommé Janus, en l'honneur du dieu romain à deux visages, a été proposé dès 1986 : il est à la fois compact et puissant, puisqu'on peut, en quelques dizaines de lignes, programmer une machine de Turing universelle.

d) Plutôt que de programmer sans s'occuper de la réversibilité, puis de confier à un outil le soin de transformer le programme, il est plus efficace de concevoir directement des programmes réversibles. Pour des applications particulières, ces derniers optimiseront au mieux les temps de calcul et le volume de mémoire nécessaire à leur fonctionnement. De nombreux systèmes de codage (par exemple de compression sans pertes, ou en cryptographie) sont logiquement réversibles, tout simplement parce qu'il faut pouvoir décoder ce qu'on a codé. Aujourd'hui, ils ne sont pas programmés de manière réversible : on utilise par exemple des ET des OU, qui ne sont pas réversibles, et donc même si la transformation correspondant au codage est globalement réversible, ce qui est calculé lors du déroulement du programme ne l'est pas. Repenser ces programmes pour qu'ils soient réversibles est sans doute la meilleure façon de procéder. C'est

important, car ce type de programmes est d'usage très courant.

e) Tous les types de programmes, dont ceux par exemple destinés à la génération de suites pseudoaléatoires ou ceux utilisant de nombreuses opérations arithmétiques, font l'objet d'études particulières pour développer les bonnes méthodes qui en produiront des versions réversibles.

f) Les portes logiques réversibles, les circuits réversibles, la synthèse et l'optimisation de circuits réversibles sont maintenant assez bien compris et maîtrisés, même si les surcoûts créés par la réversibilité restent importants et ennuyeux pour les circuits complexes.

g) Des puces dotées de jeux d'instructions réversibles sont étudiées et perfectionnées.

h) Enfin, l'utilisation de modèle de calculs quantiques réversibles est l'objet d'attentions et de recherches dont l'aboutissement concret, même s'il n'est pas immédiat, pourrait devenir la solution pour perpétuer le rythme de progrès de nos machines.

Derniers doutes ?

Signalons quand même que certains théoriciens, physiciens ou philosophes des sciences, ont longtemps refusé d'admettre le principe de Landauer. Ils ont parfois prétendu qu'il n'y avait pas de minimum de dépense lors des opérations logiquement irréversibles. Dans le cas de l'ordinateur à mouvement brownien, on a aussi argumenté qu'il y avait bien d'autres dépenses inévitables. Parfois encore, c'est l'idée d'un lien entre réversibilité thermodynamique et la réversibilité logique qui est apparue inconcevable ou même absurde. Des reformulations du principe de Landauer ont été proposées, par exemple par Charles Bennett, pour éviter ces critiques.

Quelles seront les réactions des sceptiques face aux récentes expérimentations qui soutiennent le principe de Landauer ? Même si des discussions se poursuivront pour formuler le plus soigneusement possible ces questions délicates, le lien entre réversibilité logique et thermodynamique est avéré et l'informatique réversible sera un instrument de progrès pour les ordinateurs futurs. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur
émérite
à l'université
de Lille
et chercheur

au Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille [CRISTAL].

BIBLIOGRAPHIE

*J. Hong *et al.*, Experimental test of Landauer's principle in single-bit operations on nanomagnetic memory bits, *Science Advances*, vol. 2[3], e1501492, 2016.

*J. P. S. Peterson *et al.*, Experimental demonstration of information to energy conversion in a quantum system at the Landauer limit, *Proc. R. Soc. A*, vol. 472[2188], avril 2016.

*Y. Jun *et al.*, High-precision test of Landauer's principle in a feedback trap, *Physical Review Letters*, vol. 113, 190601, 2014.

K. Perumalla, *Introduction to reversible computing*, CRC Press, 2013.

*A. Bérut *et al.*, Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics, *Nature*, vol. 483, pp. 187-189, 2012.

P. Uzan, Physique, information statistique et complexité algorithmique, *Philosophia scientiae*, vol. 11-2, 2007 (<https://philosophiascientiae.revues.org/347#text>).



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Un sommeil de glace

Pour traverser la Galaxie sans avoir à supporter de longs et ennuyeux voyages, rien n'égale le sommeil cryogénique. En refroidissant le corps, on en ralentit le métabolisme – un principe qui a des applications médicales.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER – Illustration : Marc BOULAY

D'innombrables œuvres de fiction invoquent un procédé qui interrompt temporairement la vie avant de la relancer. Si la sorcière de *Blanche Neige*, publiée en 1812 par les frères Grimm, utilise plutôt la magie pour plonger l'héroïne dans le sommeil artificiel, les histoires plus récentes sont dans un registre plus technique. Ainsi, dans *Star Wars : L'Empire contre-attaque* (Irvin Kershner, 1980), Han Solo est congelé dans de la carbonite, un matériau fictif, avant d'être remis au chasseur de primes Boba Fett.

Dans le louable souci de leur éviter l'ennui d'un interminable voyage interstellaire, les protagonistes de *La Planète des singes* (Franklin Schaffner, 1968), d'*Alien* (Ridley Scott, 1979) ou d'*Avatar* (James Cameron, 2009) sont eux aussi plongés en « animation suspendue », aussi nommée « stase » ou « sommeil cryogénique ». Comme le suggère cette dernière expression, il semble que, pour atteindre cet état, la température corporelle ait diminué au point que les fonctions métaboliques sont presque à l'arrêt.

Le refroidissement est sans doute la technique la plus utilisée dans les œuvres de fiction. *Hibernatus* (1969), d'Édouard Molinaro, raconte l'histoire d'un individu congelé vivant et réanimé soixante-cinq ans après, situation que l'on retrouve dans l'album *Le Savant fou*, de Tardi (1977), où une poignée de scientifiques ramènent à la vie un pithécantrophe conservé dans une gangue de tourbe gelée provenant de Sibé-



DANS LE FILM PASSENGERS (Morten Tyldum, 2016), les deux héros se réveillent de leur sommeil cryogénique trente ans après avoir été endormis, alors que le voyage est loin d'être terminé...

rie. La congélation permet une sorte de voyage dans le futur, comme dans le film *Demolition Man* (Marco Brambilla, 1993), où les criminels sont condamnés à une longue peine d'hibernation dans un cryopénitencier.

Il est bien connu que le froid préserve les aliments en ralentissant les réactions chimiques de décomposition ainsi que l'activité et la prolifération de microorganismes. Mais peut-on utiliser cette technique sur un humain ? L'idée d'utiliser le froid pour induire une animation suspendue de l'organisme n'est pas récente. Ainsi, Hippocrate (460-370 avant notre ère) suggérait de placer les soldats blessés dans la neige pour les maintenir en vie. En outre, la médecine a relevé quelques cas de personnes tombées dans des eaux glacées mais que l'on a pu réanimer, bien que leur cœur se soit arrêté.

Toujours en médecine, on utilise l'hypothermie induite et contrôlée pour ralentir le métabolisme de l'organisme (ou d'un organe particulier) et lui permettre ainsi de mieux résister à un manque d'oxygène. Par exemple, certaines opérations cardiaques nécessitent d'arrêter le flux sanguin pendant le travail du chirurgien. À température normale, les cellules nerveuses ne survivent que quelques minutes sans l'apport d'oxygène du sang. Au-delà, le cerveau subit des dégâts irréversibles et le sujet meurt.

Le chirurgien utilise donc la technique dite de cardioplégie froide, qui consiste à

© Sony Pictures Entertainment (2016)