

## Abrégé

Dans le futur à moyen terme, il sera de plus en plus difficile de continuer la miniaturisation des transistors qui composent les circuits intégrés. Les circuits logiques réversibles gagnent en pertinence dans l'industrie des semi-conducteurs parce qu'ils sont présentés comme une alternative plus énergétiquement efficace aux ordinateurs traditionnels. Un processus physiquement réversible ne résulte en aucun dégagement de chaleur, ce qui engendre une réduction du coût énergétique de l'opération de l'ordinateur, en plus de celui du système de refroidissement. Généralement, n'importe quel processus logiquement réversible peut être implémenté de manière physiquement réversible<sup>1</sup>. Pour être réversible, une fonction doit associer chaque résultat possible à exactement une entrée distincte. De cette façon, il est possible de déterminer l'entrée à partir de la sortie, et vice-versa. Cette stratégie logique permet aux ordinateurs de détourner la limite de Landauer<sup>2</sup>, qui désigne la quantité minimale d'énergie thermique que doit dissiper l'effacement d'un bit d'information, puisque le but de l'informatique réversible est d'éviter l'émission de chaleur lorsque de la mémoire est libérée, par exemple. Cela est accompli en faisant opérer la fonction à l'envers, en y fournissant la sortie afin de libérer l'espace occupé par le résultat une fois son utilité terminée. Des portes logiques optiques réversibles ont été proposées dans une recherche récente, et des recherches similaires visent à réinventer les composantes fondamentales des ordinateurs afin de garantir la croissance de leur puissance à long terme.

## Abstract

As transistor count growth in silicon chip faces near-future miniaturization challenges, reversible computing is becoming more and more relevant in the industry. Reversible computers are touted as being more power-efficient than traditional computers. A physically reversible process results in no heat dissipation, thus reducing the cost of computing and its collateral cooling systems. Generally, any logically reversible function can be implemented in a physically reversible way<sup>1</sup>. A reversible function requires that every possible output is matched to exactly one input. This way, it is possible to determine the input from the output, and vice-versa. Implementing this logic strategy can allow computers to circumvent Landauer's Principle<sup>2</sup>, which states that every bit erasure must dissipate a fixed amount of thermal energy, since reversible computing is all about avoiding unnecessary heat dissipation when freeing memory, for example. This is done by running the output through the function backwards to free the memory taken by the result after its use. Optical reversible logic gates operating with photons have been proposed in a recent

---

<sup>1</sup> Lloyd, S. (2004). Going into reverse. *Nature*, 430(7003), 971-971.

<sup>2</sup> Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal of research and development*, 5(3), 183-191.

paper<sup>3</sup>, and similar research are part of the effort to reinvent the building blocks of computers to guarantee continuous growth in computing power.

**Mots-clés :** Informatique, Circuits logiques, Circuits intégrés, Électronique, Calcul réversible

DRAFT 2023

---

<sup>3</sup> Cohen, E., Dolev, S., & Rosenblit, M. (2016). All-optical design for inherently energy-conserving reversible gates and circuits. *Nature communications*, 7(1), 11424.

## Introduction

Pour de nombreuses générations, la loi de Moore a été un modèle très précis décrivant l'évolution du nombre de transistors que renferment les circuits intégrés destinés à des tâches informatiques, comme les processeurs et les cartes graphiques. La loi de Moore prédit que le nombre de transistors contenus par un circuit intégré double chaque deux ans<sup>4</sup>. De manière générale, les circuits comprenant de plus grands nombres de transistors peuvent effectuer plus d'opérations par seconde, donc la loi de Moore a pu modéliser l'évolution des capacités des ordinateurs à effectuer des opérations et à résoudre des problèmes. Les implications du progrès au niveau de la puissance des ordinateurs permettent à la science d'atteindre de nouveaux sommets, comme l'intelligence artificielle conversationnelle ou la simulation précise de la structure des protéines<sup>5</sup>. Le plus récent processus « 3nm » de l'*IRDS (International Roadmap for Devices and Systems)* spécifie des portes logiques (les portes logiques sont des circuits logiques de base qui renvoient habituellement un résultat binaire—la sortie—en réponse à un ou plusieurs arguments binaires—les entrées) ayant une longueur de 18nm (d'environ 43 atomes de silicium), et le processus « 1.5nm » devant entrer en production en 2028, des portes de 12nm de longueur (environ 29 atomes de silicium)<sup>6</sup>.

Nous approchons rapidement les dimensions atomiques, ce qui est une contrainte fondamentale par rapport à la miniaturisation des circuits logiques. Une fois la barrière atomique atteinte—que la miniaturisation sera impossible, de nouvelles solutions devront être développée afin de permettre la croissance continue des capacités des circuits intégrés dans le futur.

Une de ces potentielles solutions, autour de laquelle de nombreuses recherches et articles scientifiques ont été publiés, est le calcul réversible, plus spécifiquement sous son implémentation dans les systèmes informatiques en tant que circuits logiques réversibles.

## Contexte théorique

En plus de la limite imposée par le diamètre des atomes de silicium sur la taille physique des transistors, il existe également la limite de Landauer<sup>7</sup>. Landauer, dans son article publié en 1961 dans le *IBM Journal*, discute de l'émission de chaleur par les appareils informatiques (la grande majorité des ordinateurs modernes contiennent un système de refroidissement afin d'y remédier), l'associant à l'irréversibilité logique (un système est logiquement réversible si on peut déterminer son état initial à partir de son état final, donc que chaque résultat soit associé à

---

<sup>4</sup> Moore, G. E. (1998). Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82-85.

<sup>5</sup> Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., ... & Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583-589.

<sup>6</sup> M. Moor, *International Roadmap For Devices and Systems*, 2020.

<sup>7</sup> Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal of research and development*, 5(3), 183-191.

exactement une configuration initiale) et physique (un système qui ne consomme pas d'énergie, dont on peut donc retracer le passé en l'observant dans son état final peut être considéré comme physiquement réversible) des opérations à la base de tout calcul informatique tel qu'il en est aujourd'hui. Les entrées et les sorties d'une porte logique (une porte logique est un appareil généralement binaire qui effectue des opérations de base comme « ET », « OU » ou « NON-ET » dans un ordinateur) physiquement réversible auraient donc la même énergie, tandis que les entrées d'une porte logiquement réversible. Landauer a conclu qu'effacer un bit d'information doit dissiper un minimum d'énergie. Les ordinateurs d'aujourd'hui dissipent des milliers de fois plus d'énergie que la limite de Landauer, mais les transistors actuels ne pourront pas être optimisés pour approcher significativement la limite<sup>8</sup>. Même avec une nouvelle technologie de fabrication de transistors hypothétique qui atteindrait la limite de Landauer, il serait nécessaire de développer une nouvelle approche au niveau du traitement interne de l'information par les processeurs afin de permettre de nouvelles avancées.

C'est pourquoi les circuits logiques réversibles sont considérés comme une technologie importante. Ils permettront aux circuits intégrés de consommer moins d'énergie, et de dissiper beaucoup moins de chaleur.

On peut modéliser la réversibilité d'un circuit avec l'analogie suivante: On ne peut pas déterminer la vitesse initiale d'un objet suite à son déplacement en présence de frottement sur une surface plane, une fois qu'il est au repos. Cependant, s'il n'y avait pas eu de frottement, donc que l'énergie mécanique de l'objet se serait conservée, il serait possible de retrouver sa vitesse initiale, puisqu'elle serait la même. Dans un processeur conventionnel, le frottement est comparable à l'énergie émise lorsque de l'information est effacée (de l'informations peut être effacée afin de corriger des erreurs ou pour libérer de la mémoire, par exemple). Il est alors impossible de retracer les arguments de la fonction logique exécutée. Selon Landauer<sup>9</sup>, un système réversible n'ayant pas besoin d'effacer d'information n'aurait pas strictement besoin d'émettre de la chaleur (n'oublions pas qu'en physique, un système réversible ne consomme pas d'énergie).

### Présentation des données

Il est généralement accepté que n'importe quelle opération logiquement réversible peut être implémentée de manière thermodynamiquement réversible à l'aide d'un mécanisme physique<sup>10</sup>. Des concepts de portes logiques optiques (fonctionnant en associant la présence d'un photon à un « 1 » binaire) ont déjà été décrits dans quelques recherches, dont celle d'Eyal Cohen, Shlomi

---

<sup>8</sup> Frank, M. P. (2017). The future of computing depends on making it reversible. *IEEE Spectrum*, 25(08), 2017.

<sup>9</sup> Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal of research and development*, 5(3), 183-191.

<sup>10</sup> Lloyd, S. (2004). Going into reverse. *Nature*, 430(7003), 971-971.

Dolev et Michael Rosenblit. Un mécanisme thermodynamiquement réversible serait extrêmement efficace, car il pourrait effectuer de nombreuses opérations sans nécessiter un apport d'énergie<sup>11</sup>.

La porte logique « NON » (NOT), qui renvoie l'inverse de l'entrée (donc « 1 » si « 0 » et « 0 » si « 1 ») est logiquement réversible, puisque qu'on peut déterminer l'entrée, qui est toujours l'inverse de la sortie. Cependant, son implémentation est généralement physiquement irréversible, puisque, comme un « 1 » est associé à la présence d'un certain voltage et un 0 à l'absence d'une tension électrique significative, l'énergie n'est pas la même pour l'entrée et la sortie.

La porte logique « NON-ET » (NAND), utilisée notamment dans la construction de la mémoire flash, est un exemple de porte logique à deux entrées et une sortie logiquement et, généralement, physiquement réversible. Cette porte renvoie toujours « 1 » sauf si les deux entrées sont « 1 ». La table de vérité de NAND est ci-dessous.

Tableau 1 : Table de vérité de la fonction NON-ET		
Entrées		Sortie
A	B	A NON-ET B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Comme plusieurs combinaisons d'entrées résultent en la sortie « 1 », il est impossible de retracer les entrées qui donnent ce résultat. La porte « NON-ET » est donc logiquement irréversible. De plus, comme les états énergétiques peuvent être variables, elle n'est pas physiquement réversible. Cependant, il serait possible de rendre l'opération de certaines portes logiquement irréversibles réversible en ajoutant une sortie « A » (une sortie qui refléterait la valeur de l'entrée « A »), par exemple, ce qui permettrait la réversibilité logique de l'opération. La porte « CNOT » en est un exemple<sup>12</sup>. Sa table de vérité se trouve ci-dessous.

<sup>11</sup> Cohen, E., Dolev, S., & Rosenblit, M. (2016). All-optical design for inherently energy-conserving reversible gates and circuits. *Nature communications*, 7(1), 11424.

<sup>12</sup> M. Bataille, Quantum circuits of CNOT gates: optimization and entanglement, *Quantum Information Processing* 21 (2022) 269. doi:10.1007/s11128-022-03577-8.

<b>Tableau 2 : Table de vérité de la fonction CNOT</b>			
Entrées		Sorties	
A	B	A	A CNOT B
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Cette fonction est manifestement logiquement réversible, puisque chaque entrée possible est associée à une sortie unique. Son implémentation peut être thermodynamiquement réversible (nous nous rappelons que les fonctions logiquement réversibles peuvent être conçues de manière physiquement réversible).

### **Analyse des données**

Un système informatique physiquement réversible aurait le potentiel d'utiliser moins d'énergie qu'un ordinateur conventionnel lors de son opération. De plus, la taille de son système de refroidissement pourrait être réduite. Les super-ordinateurs et les serveurs d'aujourd'hui ont besoin d'énormes systèmes de refroidissement très énergivores, et les circuits logiques réversibles pourront rendre les centres de données plus efficaces, en plus de permettre des applications où l'énergie est rare.

### **Conclusion**

Les circuits logiques réversibles peuvent opérer de manière logiquement ou physiquement réversible. Les arguments d'une fonction logiquement réversible doivent être retraçables à partir de son résultat. Une porte logique thermodynamiquement (physiquement) réversible conserve l'énergie de ses entrées en s'assurant que l'énergie des sorties soit la même. Cette conservation d'énergie peut permettre aux systèmes informatiques prenant avantage du calcul réversible d'utiliser beaucoup moins d'énergie que les ordinateurs conventionnels. De plus, contrairement aux ordinateurs actuels, qui dissipent de la chaleur lorsque l'information est effacée, les ordinateurs réversibles ne nécessitent pas de système de refroidissement expansif puisque leur fonctionnement n'efface pas d'information. De nombreuses recherches portant sur le calcul réversible proposent des mécanismes physiques qui ne reposent pas sur l'utilisation de transistors, comme des modèles optiques. Les ordinateurs transitionneront peut-être vers des composantes dont le fonctionnement n'est pas strictement électrique.