

binaire est donc un nombre entre dix et quelques millions et dépend arbitrairement du fait qu'on souhaite évaluer le nombre d'opérations utiles ou le nombre d'opérations physiques réelles qui, lui, dépend du niveau de détail avec lequel on observe le microprocesseur.

Comme certains physiciens le font parfois, et tout en étant bien conscients qu'il s'agit d'une conversion terriblement simplificatrice et approximative, nous adopterons : 1 hertz = 1 instruction par seconde = 10^5 opérations binaires par seconde.

Les ordinateurs portables actuels ont une puissance d'environ 10^9 hertz (le fameux gigahertz devenu banal depuis deux ans), donc de 10^{14} opérations binaires par seconde. Nous sommes donc très loin de la limite des 10^{51} opérations binaires par seconde donnée par le théorème de Margolus-Levitin. La loi de Moore indique que la puissance informatique de calcul double

environ tous les 18 mois, soit un gain d'un facteur 10 tous les 5 ans. Cette loi empirique est vérifiée depuis 30 ans. À cause de la limite donnée par Margolus et Levitin, cette loi ne pourra pas être satisfaite indéfiniment et au plus tard cessera de s'appliquer dans 200 ans. Il y a 37 ordres de grandeurs à franchir entre les 10^{14} opérations binaires par seconde de nos ordinateurs d'aujourd'hui et les 10^{51} opérations par seconde de l'ordinateur portable ultime : à raison d'un ordre de grandeur tous les cinq ans, il faudrait 185 ans.

UNE MÉMOIRE THERMONUCLÉAIRE!

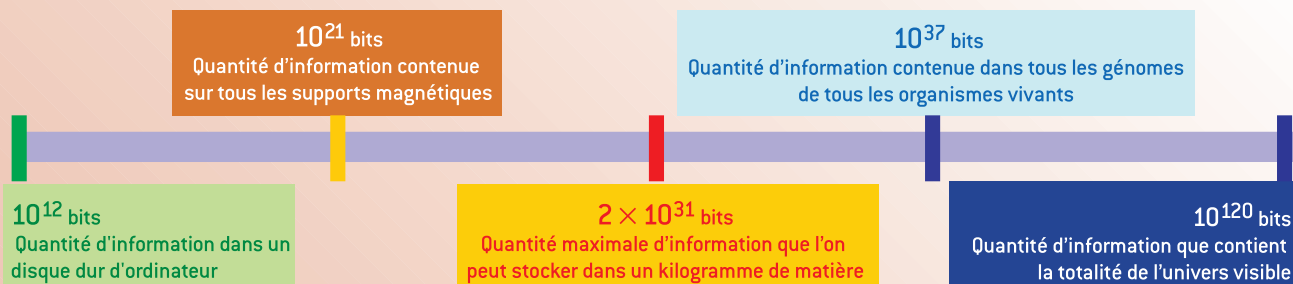
Seth Lloyd, s'appuyant sur les travaux de J. Bekenstein, a calculé la mémoire maximale d'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un volume d'un litre : $2,13 \times 10^{31}$ bits, c'est-à-dire environ

3×10^{30} octets (un octet est égal à huit bits). Pour obtenir une telle densité de mémoire, S. Lloyd fait remarquer qu'il faudrait transformer toute la matière en énergie et qu'en conséquence la mémoire de l'ordinateur ultime ressemblerait à une explosion thermonucléaire ou à un petit morceau du Big Bang... La commercialisation et l'utilisation d'un tel «appareil portable» poseront quelques problèmes pratiques. Aujourd'hui les capacités maximales de stockage de nos dispositifs les plus performants d'un kilogramme et d'un litre sont d'environ 10^{12} octets (un téraoctet) : encore 28 ordres de grandeur à franchir (soit 140 ans)!

Notons que les 2×10^{31} bits de l'ordinateur portable ultime correspondent à environ 20 milliards de fois l'information totale stockée aujourd'hui sous forme électronique à la surface de la terre, qui est évaluée à environ 10^{21} bits (voir l'article de cette rubrique de septembre 2002).



2. QUANTITÉS ASTRONOMIQUES D'INFORMATIONS

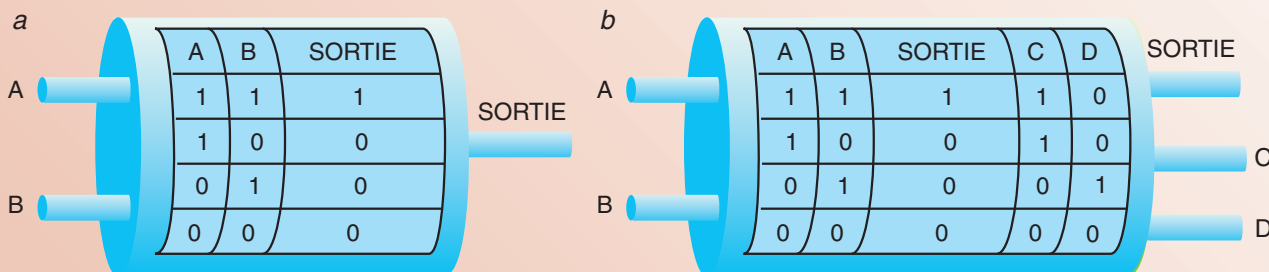


3. LA THERMODYNAMIQUE DU CALCUL

On sait depuis Maxwell qu'information et thermodynamique sont intimement liées, notamment par l'entropie qui mesure le désordre d'un système, mais certaines considérations des physiciens se sont révélées précipitées. En 1950, John von Neumann émet l'idée que toute opération binaire de calcul menée à la température T dissipait une quantité d'énergie de $k_B T \ln 2$ (où k_B est la constante de Boltzmann qui vaut $1,3805 \times 10^{-23}$ joule par degré Kelvin) accroissant donc l'entropie de $k_B \ln 2$. Cette idée s'est révélée en partie fautive. Les travaux de Rolf Landauer montrèrent en effet que seule l'opération d'effacement (irréversible) d'une information binaire avait un tel coût thermodynamique. Ainsi une porte ET classique (a) dissipe de l'énergie, car elle perd des informations : quand l'état d'une ligne de sortie est 0, on ne peut en déduire l'état des lignes d'entrée. Au contraire (b), la porte logique réversible de Frekin ne dissipe pas l'énergie : deux bits de sortie, les bits de déchets C et D, permettent de faire fonctionner la porte en sens inverse afin de ramener l'ordinateur dans son état initial. Toute opération binaire réversible peut être

ainsi menée avec un coût thermodynamique nul. Complétant ce résultat, il a été établi par Y. Lecerf en 1963, puis indépendamment par Ch. Bennett en 1973, que tout calcul peut être mené de manière réversible, et donc, sans coût thermodynamique. L'inconvénient des calculs réversibles est qu'ils conduisent à accumuler une sorte de déchet d'information : cette accumulation est créée par l'impossibilité de l'effacement qui oblige à conserver des informations parfois devenues inutiles et encombrantes.

Les méthodes de corrections d'erreurs très utilisées aujourd'hui et dont on voit mal comment on pourrait se passer pour mener des calculs fiables sont malheureusement des opérations fondamentalement irréversibles. La raison en est que corriger une erreur c'est l'effacer. S. Lloyd a calculé qu'un ordinateur ultime d'un kilogramme et d'un litre opérant à 10^{51} opérations par seconde (vitesse indépassable) devrait avoir un taux d'erreur inférieur à 10^{-10} pour éviter la surchauffe, mais que même avec ce taux très faible toute l'énergie du système serait dissipée pour opérer la correction d'erreur en moins d'une nanoseconde !



4. L'ORDINATEUR TROU NOIR

Lorsque l'on souhaite atteindre les limites physiques du calcul, le volume de l'ordinateur est déterminé par l'optimisation des opérations. Si l'on veut mener des opérations en parallèle, les paramètres importants sont la vitesse des communications et la mémoire : aussi un grand volume est préférable. Un petit volume est demandé pour une bonne exécution en série des calculs et une grande densité de mémoire.

Une très forte concentration de matière produit un trou noir et c'est pourquoi S. Lloyd a voulu évaluer les capacités de calcul de ces objets physiques très denses. Cela peut sembler absurde puisqu'aucune information ne devrait s'échapper d'un trou noir : la lumière elle-même par définition ne peut pas le quitter. Cependant la mécanique quantique montre que les trous noirs ne le sont pas complètement et qu'ils s'évaporent, c'est-à-dire émettent des particules, ce qui d'ailleurs

limite leur durée de vie. Utilisant des résultats de Don Page, S. Lloyd évalue qu'un trou noir d'un kilogramme aurait une durée de vie d'environ 10^{-19} seconde et pourrait pendant ce temps mener un calcul de 10^{32} opérations sur 10^{16} bits de mémoire.

Un tel trou noir calculerait donc à la vitesse maximale déterminée par S. Lloyd qui est d'environ 10^{51} opérations par seconde, pour un ordinateur d'un kilogramme. D'autres calculs menés par Y. Jack Ng et utilisant des méthodes différentes, confirment les résultats sur les capacités de calcul des trous noirs.

Bien sûr, l'idée de faire calculer des trous noirs est une idée de science-fiction et n'est envisagée que pour satisfaire la curiosité des théoriciens : il faudra sans doute attendre des décennies, voire des siècles, avant qu'on ne se pose vraiment la question pratique de programmer des trous noirs !

