

L'ordinateur ultime

JEAN-PAUL DELAHAYE

Depuis le Big Bang, l'Univers, vu comme un ordinateur, a effectué 10^{120} calculs élémentaires. Nos limites physiques du calcul seront atteintes avant 200 ans ; pourrions-nous jamais disposer d'une puissance de calcul infinie qui engendrerait des paradoxes ?

Quand nous déplaçons une boule de haut en bas sur l'une des colonnes d'un boulier, nous effectuons une opération binaire de calcul, tout comme lorsque nous ouvrons un interrupteur, lorsqu'un condensateur se charge, lorsque l'état d'un transistor bascule, lorsqu'une porte logique détermine le OU logique entre ses deux entrées, etc.

Un ordinateur ne fait rien d'autre que de combiner des opérations binaires : le microprocesseur évalue le produit de 2345 par 721921, recherche un mot dans un dictionnaire, modifie un document affiché à l'écran, décomprime une page provenant du réseau Internet, exécute une piste du CD-audio placé dans votre lecteur, etc.

Tout changement, tout mouvement, toute interaction dans le monde physique peuvent être décomposés en suite d'opérations binaires, donc en calculs. De ce point de vue, tout système physique est un ordinateur qui, à chaque instant, enchaîne des opérations, et la physique, finalement, n'est que la théorie du calcul.

Parions que cette idée – qu'on dénomme déjà le réductionnisme computationnel – aura un grand succès dans le siècle qui commence. Elle remplacera sans doute l'idée chère au XVIII^e siècle selon laquelle l'univers est une grande horloge dont les engrenages complexes nous entraînent indéfiniment dans leur course, ou l'idée concurrente du XIX^e siècle que l'univers n'est qu'une machine thermodynamique dégradant sans cesse l'énergie et s'acheminant inéluctablement vers la mort thermique. Nous ne prétendons pas que l'assimilation du monde physique à un ordinateur est une conception qui résume et dépasse toutes les autres, mais qu'il est amusant d'en explorer les conséquences. Nous vous proposons ici de réfléchir à cette troublante hypothèse que des travaux récents corroborent.

En 1998, les physiciens Norman Margolus et Lev Levitin, de l'Université de Boston, se sont posé la question fondamentale : combien d'états distincts un système physique donné peut-il occuper dans un temps donné ? Autrement dit, quelle est la vitesse maximale de changement d'un système physique ? On sait, d'après le principe d'incertitude de Heisenberg appliqué à l'énergie et au temps, que pour mesurer l'énergie E d'un système il faut au moins passer un temps t tel que le produit $E \times t$ soit égal à h , la constante de Planck, qui vaut $1,0545 \times 10^{-34}$ joule-seconde. Une variante élaborée de ce principe, le Théorème de Margolus-Levitin, indique que le nombre maximum d'états distincts qu'un système d'énergie moyenne E peut occuper par seconde, c'est-à-dire sa vitesse de calcul si on le considère comme un ordinateur, est donné par l'expression simple : $2E/\pi h$, où π est l'inévitable 3,14159...

Or l'énergie d'un corps de masse m est, nous le savons depuis Einstein, est égale à mc^2 . Un ordinateur portable d'une masse de 1 kilogramme, donc d'énergie $8,9874 \times 10^{16}$ joules, peut, en conséquence, opérer un maximum d'environ 10^{51} opérations binaires par seconde. Ce nombre est la puissance maximale d'un ordinateur portable ultime d'un kilogramme. Si la mécanique quantique est bien la théorie adaptée à ce genre de problèmes – ce que l'on croit aujourd'hui – alors jamais dans l'avenir, quels que soient les progrès que feront les sciences et les technologies, vous ne disposerez sur votre table d'un ordinateur de un kilogramme ayant une puissance de calcul supérieure à ces 10^{51} opérations par seconde.

1. SI LES FACULTÉS DE CALCUL DE L'UNIVERS sont telles qu'il peut simuler sa propre dynamique, il s'ensuit des paradoxes dignes de la science-fiction.

En sommes-nous loin ? Combien de temps faudra-t-il pour que cette limite absolue soit atteinte ?

HERTZ, INSTRUCTIONS, OPÉRATIONS BINAIRES ?

À vrai dire, aucune de ces questions n'est simple, car les mesures de puissance des ordinateurs contemporains sont données en hertz (nombre de cycles d'horloge par seconde du microprocesseur) ou en instructions par seconde (une instruction est une opération entre groupes de données : comparaison, addition ou multiplication de deux entiers, recopie d'un mot mémoire, incrémentation d'un compteur, etc.).

Si l'on peut admettre, en gros, qu'un hertz correspond à quelques instructions par seconde (de un à dix selon les microprocesseurs), en revanche la conversion des instructions en opérations binaires est délicate, car tout change d'un microprocesseur à un autre et ce qui se passe au cours d'un cycle est très variable. Les processeurs actuels comportent plusieurs millions de transistors (42 millions de transistors pour le Pentium-IV) donc, à chaque cycle d'horloge du microprocesseur, un très grand nombre d'opérations binaires peuvent être effectuées, en théorie plusieurs millions. En revanche, le nombre d'opérations binaires utiles (impossibles à réduire par une meilleure conception des circuits ou organisation des calculs) est bien plus petit : pour additionner deux entiers codés sur 32 bits, une centaine d'opérations binaires suffisent ; pour une multiplication, un millier d'opérations binaires conviennent. Le facteur de conversion entre cycle (ou instruction) et opération

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).



Javier Dauden/Corbis/IG