



Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Votre ordinateur de bureau finira-t-il par avoir la puissance de calcul du cerveau humain?

*Si tu t'imagines, fillette, fillette,
Si tu t'imagines que ça va durer,
Ce que tu te goures, ce que tu te goures...*

En 1949 déjà, quand Juliette Gréco chantait la chanson *Si tu t'imagines* dans les caves de Saint-Germain-des-Prés, on peut penser que le célèbre Dr. Schutz célébré par Boris Vian comparait des machines qui n'avaient même pas la puissance de calcul de nos

téléphones portables à des cerveaux électroniques! Pourtant, après cinquante ans de progrès, nos ordinateurs n'égale-t-ils toujours pas nos cerveaux sur de nombreux points.

Lorsque tout va très vite, on perd ses marques, et, en matière de performances informatiques, il y a si longtemps qu'on nous prétend que la nouvelle machine est incomparablement supérieure aux précédentes qu'on finit par ne plus rien y comprendre.

Dans le vertige du progrès rapide et continu, on pourrait croire que tout est possible... y compris ce qui ne l'est pas : certains calculs sont à la limite de ce qui est envisageable, certains autres devront attendre quelques années, d'autres enfin sont hors de portée pour des décennies, voire pour des siècles ou à tout jamais. Tentons de fixer des repères.

LES LOIS DE MOORE

En avril 1965, dans un article publié dans la revue *Electronics Magazine*, Gordon Moore (qui dirige alors la recherche chez *Fairchild Semiconductors* et qui cofondera avec Robert Noyce la firme *Intel* en 1968) remarque que, depuis l'invention du circuit intégré (en 1958), on observe un doublement annuel du nombre de transistors par unité de surface. Il prédit que ce doublement durera encore dix ans.

Sa prévision se réalisera assez bien ; pourtant, en 1975, dans un exposé où on lui demande de proposer un nouveau pronostic, G. Moore, analysant les difficultés technologiques présentes, annonce cette fois un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les deux ans (au lieu de tous les ans).

En prenant en compte l'augmentation de la fréquence d'horloge des microprocesseurs (la vitesse avec laquelle on les fait calculer), ou en faisant la moyenne entre les prédictions de 1965 et celles de 1975, certains des collègues électroniciens de Moore ont reformulé les prédictions et ont parié sur un doublement de performance tous les 18 mois. C'est ce qu'abusivement aujourd'hui nous dénommons la *Loi de Moore* et que nous dénommerons ici la loi de Moore *standard* : «les performances informatiques doublent tous les 18 mois».

Il existe dans la littérature d'autres versions de ce qu'est la loi de Moore, mais la réalité (que G. Moore lui-même atteste quand on l'interroge) correspond

1. CAPACITÉS DE CALCUL DEPUIS LE DÉBUT DU SIÈCLE

La loi de Moore n'a de sens que pour la période, commençant en 1958 et se terminant sans doute prochainement, des circuits imprimés obtenus par lithographie optique. Pour savoir s'il existe une loi plus générale incluant plusieurs technologies de calcul différentes, Ray Kurzweil dans son livre *The Age of Spiritual Machines* (Penguin Books, New York, 1999) a évalué la puissance de calcul des machines en instructions par seconde pour un dollar sur toute la durée du XX^e siècle. Durant cette période, cinq technologies de calcul différentes se sont succédé.

Ray Kurzweil évalue que, de 1900 à 2000, nous sommes passés de 10^{-8} à 10^5 instructions par seconde pour un dollar. En un siècle, la puissance de calcul pour une somme d'argent donnée a donc augmenté d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, soit un doublement tous les 2,4 ans.

Ce résultat suggère que la loi de Moore est généralisable. On peut donc espérer que, lorsque la technologie de la gravure optique des circuits intégrés aura atteint ses limites (vers 2020 ou avant), elle sera remplacée par une autre technologie qui prendra le relais et permettra la poursuite des gains réguliers des performances informatiques.

Indiquons quelques repères indiqués par le spécialiste Ray Kurzweil (les chiffres représentent le nombre d'instructions par seconde, par dollar dépensé).

Machine analytique 1900	10^{-8}
Tabulateur IBM 1919	10^{-6}
Calculateur Bell Modèle I 1940	10^{-5}
ENIAC 1946	10^{-3}
Univac1103 1953	10^{-2}
DEC PDP1 1960	10^{-1}
DEC PDP8 1965	2
Altair 8800 1975	10
IBM PC 1982	10^{+2}
Pentium II 1999	10^{+5}



à la version que nous avons donnée : deux énoncés, l'un en 1965, l'autre en 1975 concernant la densité des transistors, conduisent à l'énoncé de la loi standard de Moore : un doublement de performance tous les 18 mois.

Notons qu'il ne s'agit pas, bien sûr, d'une loi mathématique ou physique, mais d'une simple règle hypothétique permettant l'évaluation de l'avenir des performances informatiques. Ces performances résultent d'une combinaison de facteurs sociaux, économiques, technologiques et physiques : les succès des techniques informatiques auprès du public (facteur social) et la concurrence entre firmes (facteur économique) déterminent les bénéfices de l'industrie des semi-conducteurs, qui fixent à leur tour l'investissement en recherche de cette industrie (facteur technologique), lui permettant de surmonter les obstacles qu'oppose la réalité matérielle (facteur physique).

Un doublement de performance tous les 18 mois est équivalent à une multiplication par 1 000 tous les 15 ans (dix doublements valent exactement une multiplication par 1 024) et à une multiplication par un million tous les 30 ans. Si les performances des voitures avaient suivi le même rythme, nous roulerions aujourd'hui un million de fois plus vite qu'en 1970, soit environ à 30 000 kilomètres/seconde... et dans six ans nous dépasserions la vitesse de la lumière ! G. Moore, voyant que chaque prédiction concernant l'évolution de l'informatique lui est attribuée dit avec humour qu'il est l'inventeur de la fonction exponentielle comme Al Gore est l'inventeur d'*Internet* (Gordon Moore est républicain!).

Menons un petit calcul pour tester la loi de 1975. Nous sommes passés de 2 300 transistors pour le *Intel-4004* de 1971, à 42 millions de transistors pour le *Pentium 4* disponible depuis novembre 2000. Cela correspond à un facteur multiplicatif de 18 260 en 29 ans, soit une multiplication par $18\,260^{2/29} = 1,967$ tous les deux ans, valeur remarquablement proche du facteur 2 du second pronostic de Moore.

L'augmentation de densité prédite s'est précisément réalisée entre 1971 et aujourd'hui, mais, comme Moore le fait remarquer, sa prophétie était «auto-réalisatrice» : l'industrie (et lui-même en particulier comme acteur de premier plan de cette industrie) s'est fondée sur elle pour fixer ses objectifs et ses plans d'investissements.

Gordon Moore, aujourd'hui milliardaire et âgé de 71 ans, a évalué que les usines de circuits produisent chaque année plus de transistors (10^{17} environ), qu'il n'existe de fourmis sur terre (10^{16} ,

nombre proposé par le naturaliste Edward Wilson). Ramené au nombre d'humains sur terre, on peut aussi noter que, chaque année, plus de dix millions de transistors sont dessinés pour chaque être humain : les inventeurs du transistor de 1947 (W. Shockley, W. Brattain, J. Barden) peuvent être fiers d'eux !

EST-CE QUE CELA VA CONTINUER? NON

Gordon Moore prévoit maintenant que sa loi ne restera pas indéfiniment vraie. Il pense que, dans les dix prochaines années, elle sera satisfaite, mais au-delà, il prédit un ralentissement, le rythme se réduisant à un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les quatre ans (donc un doublement de performance tous les trois ans environ).

Si l'on s'en tient au perfectionnement des techniques de gravure optique des puces, on devra utiliser des longueurs d'onde de plus en plus courtes. Or, au mieux, on ne peut graver des traits qu'avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Comme plus rien n'est transparent pour les longueurs d'onde très courtes, on ne peut plus concevoir et réaliser des lentilles pour contrôler la gravure au-delà d'une limite qu'on n'est pas loin d'atteindre. Aujourd'hui, les longueurs d'onde utilisées se situent entre l'ultraviolet et les rayons X. Le récent *Pentium 4*, par exemple est dessiné avec une gravure de 180 nanomètres. On étudie déjà ce que l'on va pouvoir faire avec des longueurs d'onde de 130 nanomètres et l'on envisage pour la prochaine décennie des longueurs d'onde de 15

2. QUELLE EST LA PUISSANCE DU CERVEAU HUMAIN?

- Se fondant sur une étude détaillée de la rétine humaine, Hans Moravec, de l'Université *Carnegie Mellon*, évalue que le cerveau humain est équivalent à un ordinateur d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde.
 - Nick Bostrom, de l'Université de Yale, propose une évaluation fondée sur le raisonnement suivant. Dans le cerveau humain, il y a environ 10^{11} neurones, chacun possédant environ 5 000 synapses ; les signaux circulent au travers de ces synapses à la vitesse de 100 décharges par seconde environ, et chaque signal porte approximativement 5 bits d'information. Au total, le cerveau opère donc un calcul d'environ 25×10^{16} opérations binaires par seconde qui, ramenées en instructions par seconde, donnent le nombre approximatif de 10^{17} instructions par seconde.
 - Ray Kurzweil, par un calcul analogue, arrive au nombre un peu inférieur de 2×10^{16} instructions par seconde.
 - Ralph Merkle qui, lui, fait une estimation en se fondant sur la consommation d'énergie par un neurone comparée à la consommation totale du cerveau, obtient une fourchette : le cerveau humain aurait une puissance comprise entre 10^{13} et 10^{16} instructions par seconde.
 - Certains spécialistes, arguant de la complexité interne des neurones, qui seraient chacun de petits calculateurs, suggèrent que ces nombres doivent être multipliés par 100, ce qui conduit à 10^{19} instructions par seconde.
- Notons encore que le véritable équivalent informatique en calcul du cerveau pourrait être plus faible que l'estimation la plus basse de 10^{13} (Merkle). En effet, il est certain que, pour effectuer une multiplication comme 43×52 , un cerveau humain mobilise une énorme force de calcul impliquant des millions de neurones pendant plusieurs secondes, qui effectuent donc l'équivalent de millions d'instructions, alors qu'une puce fait une telle multiplication en quelques instructions. Si d'autres activités mentales sont aussi "mal programmées" dans notre cerveau, alors l'imitation du cerveau pourrait être obtenue avec une puissance bien inférieure à celle qu'il possède.

En résumé, les estimations de la puissance du cerveau humain oscillent entre 10^{13} et 10^{19} instructions par seconde, cette fourchette pouvant peut-être être élargie vers le bas. Cela est certes très imprécis, mais reflète l'ignorance où nous sommes de ce que fait un cerveau.

