

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 fournis 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. Braitain, 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.



nanomètres, qui semblent la limite des méthodes actuelles.

Au-delà, les procédés de lithographie devront utiliser les rayons X (technologie étudiée par IBM) ou des faisceaux d'électrons (technologie étudiée par Bell), mais ces nouvelles méthodes ne sont plus de simples prolongements de ce qu'on sait faire, elles demanderont donc des investissements nouveaux colossaux... et de la chance, car on ne peut être certain que cela va marcher.

Quant aux projets de développements de calculateurs quantiques ou à ADN étudiés dans certains laboratoires de recherche, Gordon Moore, comme la plupart des spécialistes, pense que cela ne pourra jouer un rôle que dans un avenir lointain, et en tout cas pas dans les dix ans à venir.

Parmi les variantes de la loi de Moore, la loi de Rock inquiète de nombreux observateurs. Elle énonce que le coût en investissements double tous les quatre ans. L'industrie du microprocesseur est une industrie de l'ordre de 200 milliards de dollars par an, qui investit 10 pour cent de ses revenus dans la recherche et le développement. La loi de Rock, freinerait peut-être plus les progrès envisageables (les doubléments de performances prévus tous les 18 mois) que les difficultés liées à la physique, car rien en économie ne croît aussi vite et, tôt ou tard, il y aura un manque de ressources financières, en tout cas avant

que la totalité des richesses économiques terrestres ne soient consacrées à la fabrication de microprocesseurs! La limitation économique imposera sa contrainte à la courbe exprimant la densité de transistors en fonction du temps.

Notons, en passant, que la loi de Machrone, variante humoristique de la loi de Moore, est étonnamment exacte : l'ordinateur dont vous rêvez vaut toujours 5 000 dollars (ou euros).

EST-CE QUE ÇA VA CONTINUER? OUI!

Lorsqu'on observe certains aspects particuliers des performances informatiques, on découvre que la loi de Moore (standard) a été récemment dépassée dans trois domaines où l'augmentation des performances a été plus rapide que le fameux doublement tous les dix-huit mois. Ces trois domaines sont l'affichage graphique, le stockage sur disques magnétiques et la capacité des fibres optiques.

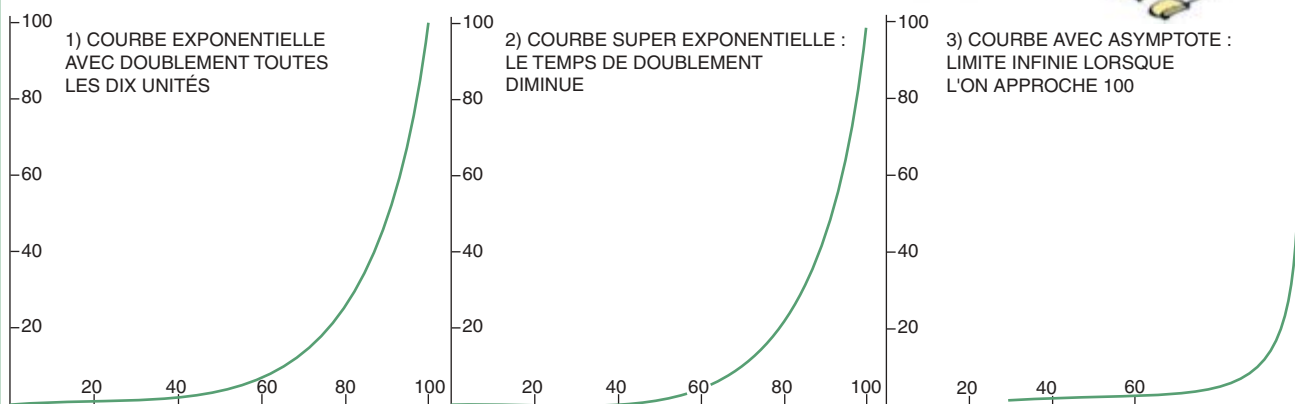
Fin 1998, pour 250 \$, on pouvait disposer d'une carte graphique traitant un million de polygones par seconde et produisant donc de belles animations 3-D en images de synthèse. Les spécialistes annoncent, pour un prix équivalent, des cartes capables d'afficher 100 millions de polygones par seconde à la fin 2001. Le gain en performance sera donc d'un facteur 100 en trois ans, ce qui

correspond à un facteur 10 en 18 mois, bien plus que le doublement habituel. L'explication de ces progrès accélérés se trouve dans le succès commercial des jeux utilisant les simulations 3-D qui ont conduit à la mise au point de puces spécialisées ; celles-ci bénéficient à la fois des progrès d'intégration (le nombre de transistors par unité de surface) de la fréquence plus élevée des processeurs (ces deux facteurs conduisent au doublement tous les 18 mois), et tirent aussi avantage d'une meilleure conception des algorithmes et du dessin optimisé des circuits. C'est là que les progrès dans la maîtrise mathématique et le savoir-faire spécialisé sont responsables de ce dépassement des prévisions : non seulement l'électronicien avance, mais aussi le mathématicien et l'informaticien.

Dans le domaine du stockage des données sur disques magnétiques, la loi



3. LES PRÉVISIONS DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE DE CALCUL



L'augmentation des performances informatiques franchit les transitions technologiques produisant des doubléments à intervalles réguliers, qui semblent même à certains analystes de plus en plus rapprochés. Trois hypothèses sont à envisager. (1) La courbe de performance informatique est déterminée par une fonction exponentielle, c'est-à-dire une fonction de type : $t \rightarrow C \cdot a^t$: l'espace entre deux doubléments est constant. (2) La courbe de performance est déterminée par une fonction super-exponentielle, par exemple $t \rightarrow C \cdot t^t$: la durée entre deux doubléments diminue. (3) La courbe de

performance possède une asymptote verticale comme celle de la fonction $t \rightarrow C/(s - t)$: lorsque t s'approche de s , la singularité, la performance, tend vers l'infini. Si la troisième hypothèse est vérifiée, alors se pose la question de l'interprétation de cette singularité. Ce changement radical a été théorisé par V. Vinge, du Département de mathématiques de l'Université de San Diego, qui considère qu'elle correspond à la mise au point de machines plus intelligentes que l'homme. Bien sûr, ces réflexions prospectives proches de la science-fiction sont considérées avec méfiance par la majorité des scientifiques.