

de Moore s'est appliquée sans fantaisie jusqu'en 1998, mais, depuis, suite à des avancées techniques accélérées (ici, il ne s'agit plus de densité de transistors, mais de maîtrise des constituants magnétiques), l'augmentation de la capacité de stockage est multipliée par 3,5 tous les 18 mois, beaucoup plus que ce que prévoit la loi de Moore standard. Les disques durs d'un téraoctet (10^{12} octets, c'est-à-dire mille milliards de caractères) dont nous allons pouvoir disposer d'ici peu permettront de stocker l'équivalent d'un million de livres de 200 pages, ou 400 cassettes vidéo VHS, ou encore toutes les conversations d'une personne durant toute sa vie!

Enfin, dans le domaine du transport optique d'informations on assiste, grâce au procédé de multiplexage (passage simultané de plusieurs lumières de longueurs d'onde différentes dans la même fibre) à un doublement de capacité tous les six mois (multiplication par 8 tous les 18 mois) largement supérieur encore à ce qu'une traduction directe de la loi de Moore standard laisse espérer.

Ces accélérations dans des domaines particuliers seront peut-être momentanées, et la loi de Moore d'un doublement de performance tous les 18 mois semble pour l'instant le repère général le plus fiable pour envisager l'avenir des performances informatiques dans les dix prochaines années.

PRÉVISIONS À LONG TERME

La loi de Moore, relativement précise, s'applique sur une assez courte période de temps, car, dans l'esprit de son inventeur, elle ne concerne vraiment que la technologie des circuits intégrés qui sont dessinés en utilisant une lithographie optique classique sur du silicium. Les autres méthodes de lithographie étudiées, les idées d'ordinateurs optiques, quantiques ou à ADN constitueront des sauts technologiques dont personne aujourd'hui ne peut vraiment être certain du succès. Dans 20 ans, ou bien nous aurons rencontré un mur, et les performances auront cessé de croître au rythme actuel, ou bien nous aurons réussi une transition technologique.

La prévision pour le siècle qui commence doit donc se fonder sur une vue plus générale provenant de l'étude du passé sur une période incluant des transitions technologiques importantes. Plusieurs de ces études ont été menées, dont celle de Ray Kurzweil (*The Age of Spiritual Machines*, Penguin Books, 1999) qui couvre le xx^e siècle dans sa totalité.

4. LE PLUS GROS ORDINATEUR D'AUJOURD'HUI ET CEUX DE DEMAIN

Le plus puissant ordinateur du monde aujourd'hui est un ordinateur IBM répondant au doux nom de *ASCI-White-SP-Power-3-375-MHz*. Installé depuis novembre 2000 en Californie, il dispose d'une puissance de 5 000 GFLOPS, ou, en gros, 10^{13} instructions par seconde. Le FLOPS (Opération en virgule flottante par seconde) qui donne naissance au MFLOPS (10^6 FLOPS) et au GFLOPS (10^9 FLOPS) et au TFLOPS (10^{12} FLOPS) est utilisé pour l'évaluation des ordinateurs destinés aux calculs avec des nombres réels dont on a besoin en météorologie et dans le domaine de la physique atomique. On peut sommairement évaluer qu'un FLOPS vaut de 2 à 10 instructions par seconde, d'où notre conversion des 5 000 GFLOPS en 10^{13} instructions par seconde. L'ordinateur numéro un n'est pas un «micro», loin s'en faut : il occupe une surface au sol équivalente à celle de deux terrains de basket, pèse plus de cent tonnes, et possède 8 192 processeurs de calculs travaillant en parallèle pour réaliser des simulations d'explosions atomiques, ce qui est moins polluant que de les réaliser dans l'atmosphère. Jusqu'à présent, la physique atomique était la plus grosse consommatrice de puissance informatique. Les choses sont en train de changer, et les sciences de la vie devraient rapidement passer en tête.

Un système dédié à des calculs bioinformatiques d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde est en cours de conception et sera opérationnel en 2004. Ce projet résulte d'une association entre *Celera* (firme privée s'occupant du séquençage des génomes et ayant déjà apporté une contribution majeure au projet de séquençage du génome humain), *Compaq* (Société informatique) et le *Sandia Labs* (Laboratoire du Département de l'énergie américaine qui s'occupe aujourd'hui de physique nucléaire). Cet effort sans précédent dans le domaine des sciences de la vie est une réponse au défi lancé par J. Craig Venter, président de *Celera*, qui a déclaré que «les plus puissants systèmes informatiques d'aujourd'hui ne sont pas en mesure de satisfaire les besoins en calcul rencontrés dans le domaine de la génomique».

La firme IBM, qui n'est pas en reste, développe un système appelé *Blue Gene* dont la puissance prévue est dix fois supérieure encore, soit 10^{15} instructions par seconde environ. Si l'on accepte le chiffre moyen de 10^{15} pour la puissance d'un cerveau, *Blue Gene* sera le premier ordinateur à égaler un cerveau.

Nous assistons à un changement de perspectives, et les gros ordinateurs qui, depuis l'ENIAC, ont toujours été développés dans le cadre de projets militaires, vont maintenant laisser la place à des systèmes développés à des fins plus pacifiques dans le cadre de la recherche en biologie. Paul Robinson, président des Laboratoires *Sandia*, confirme ce changement de tendance : «L'industrie des armes nucléaires pensait depuis des années que rien n'était plus complexe que la physique atomique. En réalité, rien ne dépasse la complexité de la biologie, le génome humain et les défis qu'il soulève».

Les machines à calculer mécaniques ou à relais électromécaniques n'utilisaient pas de transistors. La première question à résoudre pour traiter du XX^e siècle dans son entier est donc : comment comparer la puissance de machines, dont certaines ne pouvaient faire que quelques additions par minute, à d'autres qui affichent des millions de pixels par seconde.

Aucune unité précise de calcul ne peut être proposée, et les organismes qui aujourd'hui expertisent les machines et les comparent (par exemple, *Top500* à l'adresse www.top500.org) le font tou-

jours à partir de jeux de tests variés (dénommés *benchmarks*) qui leur fournissent des indices de comparaison spécifiques. Les méthodes fondées sur ces jeux de tests ne permettent que de comparer des machines proches dans le temps et la conception : on comprend qu'il soit difficile de demander à l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) de 1945 d'exécuter un programme de traitement de texte actuel ou le dernier jeu avec images animées en «full 3D». D'ailleurs, aucun ENIAC n'est aujourd'hui en état de marche!



5. QUI DISPOSE DE PLUS DE PUISSANCE DE CALCUL AUJOURD'HUI : LES MILITAIRES, LES PROPRIÉTAIRES DE PC OU LES ENFANTS ?



La puissance cumulée des 500 plus grosses machines actuelles est évaluée à 88 TFLOPS, ce qui donne environ 10^{15} instructions par seconde, qu'on peut en gros considérer comme la puissance dont disposent les militaires aujourd'hui. La puissance cumulée des PC (cinq cents millions de machines ayant une puissance moyenne d'environ 2×10^8 instructions par seconde) est plus de cent fois supérieure (10^{17}). Même les enfants avec leurs consoles de jeux battent les militaires. En effet, les consoles de jeux se vendent par dizaines de millions – 76 millions d'exemplaires de la *Playstation* première génération de *Sony* – et disposent d'une puissance de calcul cumulée du même ordre de grandeur que celle de tous les micro-ordinateurs du monde. À vrai dire, les données qui permettraient de départager les ordinateurs personnels des consoles de jeux ne sont pas disponibles avec assez de précision (ce qui, de toutes les façons, ne permettrait pas une conclusion très intéressante, puisque de nombreux PC sont utilisés... comme console de jeux!)

En comptabilisant tous les ordinateurs petits et moyens, tous les microprocesseurs (dans les téléphones portables, les machines à laver, etc.), on peut sommairement évaluer qu'aujourd'hui l'humanité dispose d'une puissance de calcul électronique de 10^{18} instructions par seconde, ce qui dépasse sans doute la puissance de calcul du cerveau humain (rappelons la fourchette 10^{13} – 10^{19} proposée pour évaluer cette puissance).

En définitive, sur une longue période, on ne peut éviter d'avoir recours aux unités de mesure. Comme aucune méthode ne définit d'unités précises et fiables, il faut se contenter de mesures assez vagues. Cela n'est pas très grave, car dans un univers en croissance exponentielle comme celui de l'informatique, une incertitude d'un facteur dix, voire cent, correspond à une courte période de temps et ne compromet pas l'analyse générale.

Une opération élémentaire de calcul devrait en toute logique correspondre à une opération binaire élémentaire comme le calcul d'un OU ou d'un ET entre deux données binaires : «0 ou 1 = 1», «1 et 0 = 0», etc. Le plus souvent, on désigne par opération élémentaire (ou instruction élémentaire, ou calcul élémentaire) une manipulation (copie, transfert, duplication, etc.) d'un mot de l'ordinateur auquel on s'intéresse, mot comportant plusieurs informations binaires. Selon la longueur du mot (qui change d'un ordinateur à l'autre), une instruction équivaut donc à un nombre d'opérations binaires élémentaires compris entre 10 et 100, voire plus. Toutes sortes d'autres raisons rendent impossible la définition d'une mesure universelle précise et fiable de l'unité de calcul,

et il faut se contenter de mesures approximatives pour suivre le progrès des ordinateurs sur le long terme. L'unité instruction, aussi imparfaite soit-elle, est cependant le moins mauvais outil de comparaison qui existe, et c'est lui qu'on retient en général.

L'instruction donne naissance à l'unité de puissance IPS (instruction per second), qui conduit à l'unité la plus souvent mentionnée aujourd'hui, le MIPS : million d'instructions par seconde. Cependant cette unité est tellement manipulée commercialement que certains en plaisantent et disent que MIPS signifie *Meaningless Indicator of Performance for Salesmen* (indicateur de performance sans signification pour commerciaux).

Le prix des machines informatiques pouvant varier considérablement, une étude sérieuse se devait d'en tenir le plus grand compte : c'est pourquoi finalement Ray Kurzweil a adopté dans son étude futuriste l'unité «instruction par seconde pour 1 \$». Il constate une évolution allant de 10^{-8} en 1900 à 10^5 en 2000, soit une augmentation de puissance – pour une somme donnée – d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, équivalant à un doublement tous les 2,4 ans.

Au cours du XX^e siècle, une multitude de technologies de calcul ont défilé : machines mécaniques (à base d'engrenages et de tringles métalliques), puis machines électromécaniques (assemblage d'interrupteurs commandés par électroaimants – appelés «relais» – et connectés), puis machines électroniques (construites avec des kilomètres de fils et des milliers de lampes), puis machines à transistors isolés (fichés individuellement sur des cartes), et enfin machines à circuits intégrés (comportant des transistors dessinés simultanément par lithographie optique par centaines, puis par millions).

Les transitions technologiques se sont non seulement faites à chaque fois que cela a été nécessaire, sans que jamais la capacité de calcul ne stagne, mais, en fait, les transitions ont conduit à un progrès qui s'est légèrement accéléré, passant d'un doublement de performances tous les trois ans au début du XX^e siècle, à un doublement tous les ans aujourd'hui.

LA SINGULARITÉ ?

Comparée à l'analyse sur tout le XX^e siècle, la période de 1965 à 2000 que couvre la loi de Moore, n'est donc pas exceptionnelle et, bien au contraire, se conforme à une loi plus générale que l'on peut imaginer valable encore au XXI^e siècle.

L'augmentation des performances de calcul saute par-dessus les transitions technologiques et produit des doublements de performances à intervalles de plus en plus rapprochés. Reste que la diminution du temps nécessaire à un doublement nous amène à nous interroger. La variation de la performance en fonction du temps t ne serait pas une exponentielle de la forme a^t , mais une courbe à croissance superexponentielle, par exemple t^t , ou même une courbe à asymptote verticale en $1/(s-t)$ (lorsque t s'approche de s , la singularité, $1/(s-t)$ tend vers l'infini).

L'hypothèse de la courbe superexponentielle conduit à imaginer un futur où non seulement le progrès se poursuit, mais s'accélère sans cesse, de nouvelles technologies prenant le relais de celles qui, épuisées, ne produisent plus de puissance nouvelle.

Si, comme le pensent certains experts, quantité de problèmes informatiques que chacun rencontre (instabilité des systèmes d'exploitation et des programmes, incompatibilités des logiciels les uns avec les autres ou avec les matériels utilisés, complexité mal maîtrisée à tous les niveaux, etc.) proviennent de la rapidité trop grande des