

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.

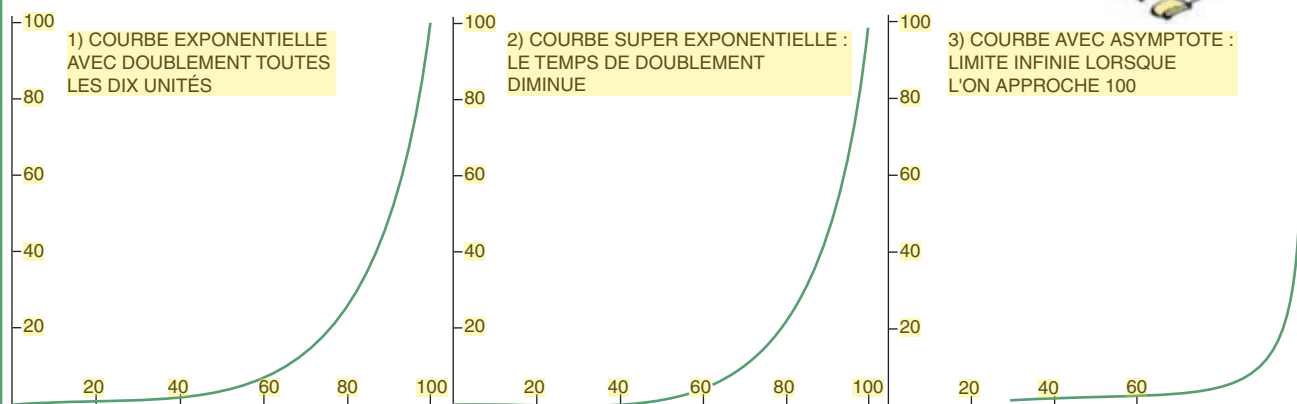
Fin 1998, pour 250 \$, on pouvait disposer d'une carte graphique traitant un million de polygones par seconde et produisant donc de belles animations 3-D en images de synthèse. Les spécialistes annoncent, pour un prix équivalent, des cartes capables d'afficher 100 millions de polygones par seconde à 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.

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!

