

le *Mac Power Book 165c*) à  $2\,880 \times 1\,800$  pixels pour les meilleurs écrans couleurs de 2013 (par exemple le *MacBook Pro* écran *Retina* 15 pouces). Le gain est d'un facteur 20 en nombre de pixels en 20 ans, soit un facteur 1,25 tous les 18 mois : pour les écrans, nous sommes loin des chiffres annoncés par la loi générale.

## Consommation d'énergie et miniaturisation

La raison principale (mais pas la seule) de ces avancées est que d'une génération de puces à la suivante, la taille des dessins sur les microprocesseurs a été réduite de 30 %, conduisant à une réduction d'occupation de surface de 50 % pour un transistor (car  $0,7 \times 0,7 \approx 0,5$ ). Cela a permis un accroissement de vitesse (la fréquence) de 40 %. De manière répétée pendant quatre décennies, pour une surface donnée, on a ainsi réussi l'in vraisemblable doublement du nombre de transistors et l'accélération des calculs. Malheureusement, tous les autres paramètres en jeu n'ont pas évolué de la même façon. En particulier, la consommation d'énergie et la dissipation se sont petit à petit accrues, créant à la longue un grave problème. Les temps d'accès à la mémoire de masse (les disques durs) n'ont pas toujours bien suivi, ce qui a limité la progression de certaines performances.

Pour lutter contre les problèmes de consommation d'énergie et de dissipation

de chaleur, une méthode est d'utiliser des puces à plusieurs cœurs. La multiplication de ces sous-unités du processeur travaillant simultanément en communiquant peu limite les échanges sur de longues distances dans le microprocesseur et donc l'échauffement électrique. Il existe des puces à dix cœurs et on envisage d'aller plus loin, au point qu'on évoque une formulation nouvelle de la loi de Moore annonçant un doublement du nombre de cœurs tous les deux ans. Malheureusement, cette stratégie ne donne un accroissement de puissance que pour le traitement en parallèle de plusieurs tâches, sans vraiment augmenter la vitesse de chacune. De ce fait, la vitesse de traitement des PC vendus ces trois dernières années s'est accrue non plus de 40 % par an en moyenne comme ce fut longtemps le cas, mais seulement de 10 à 20 % selon les applications.

D'après certains analystes, il s'agit des premiers effets de la rencontre avec le mur des réalités physiques qui va mettre fin à la loi de Moore. Cette baisse de puissance serait d'ailleurs l'explication principale de la baisse sensible de la vente des PC constatée depuis peu. Pouvant garder plus longtemps leurs machines qui ne subissent plus un processus d'obsolescence aussi rapide qu'auparavant, les consommateurs les renouvellent moins... d'autant qu'ils préfèrent parfois s'acheter des téléphones ou des tablettes dont les marchés cannibalisent celui des PC, aggravant le phénomène et risquant à terme de déstabiliser une partie

importante du secteur de l'électronique et de l'informatique.

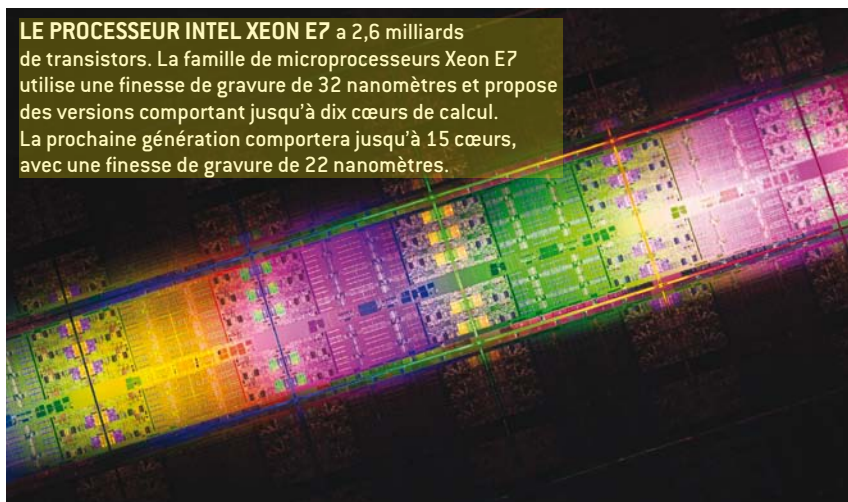
Nul ne conteste que la loi de Moore finira par se heurter à une barrière physique. Sans évoquer les limites extrêmes que les théoriciens de la mécanique quantique calculent, il est peu probable qu'on puisse stocker plus d'un bit d'information par atome de matière. Des limites économiques sont aussi à craindre : le coût des investissements nécessaires pour maintenir le progrès augmente exponentiellement (loi de Rock) et nous conduira à un point impossible à dépasser puisque l'économie ne peut consacrer la totalité de ses investissements à la conception et à la production de la prochaine génération de puces électroniques. La question est : sommes-nous proches du moment où la loi de Moore cessera d'être vraie et où il faudra affronter toutes les conséquences de l'arrêt de ce stimulant économique ?

Dès 2005, G. Moore pronostiquait que la fin était en vue. « Cela ne peut durer indéfiniment. Le propre d'une exponentielle est de vous entraîner hors des limites raisonnables jusqu'à un éventuel désastre. La taille d'un transistor approche celle d'un atome, qui est une barrière fondamentale. Nous l'atteindrons d'ici deux ou trois générations [de microprocesseurs]. »

## Murs infranchissables

La réalisation d'un transistor à un seul atome en 2012 par une équipe de l'Université des Nouvelles-Galles-du-Sud, en Australie, nous place devant le mur. Même si l'exploit de laboratoire ne concernera pas nos machines avant quelques années, il fixe un point indépasseable des techniques de gravure microélectronique.

Dès 2012, le physicien américain Michio Kaku formulait un pronostic définitif : d'ici dix ans, il en sera fini de la loi de Moore ; d'ici 2022 au plus tard, les progrès de l'industrie du silicium auront pris fin. L'utilisation de transistors en trois dimensions (depuis peu proposés par Intel) et bientôt peut-être de puces elles-mêmes en trois dimensions permettra sans doute de maintenir un certain rythme de progrès pendant



**LE PROCESSEUR INTEL XEON E7** a 2,6 milliards de transistors. La famille de microprocesseurs Xeon E7 utilise une finesse de gravure de 32 nanomètres et propose des versions comportant jusqu'à dix cœurs de calcul. La prochaine génération comportera jusqu'à 15 cœurs, avec une finesse de gravure de 22 nanomètres.

## 2. L'importance de l'énergie : la loi de Koomey

Une loi plus précise que la loi de Moore a été énoncée dans un article récent de Jonathan Koomey, de l'Université Stanford, et ses collègues (*IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 33(3), pp. 46-54, 2011).

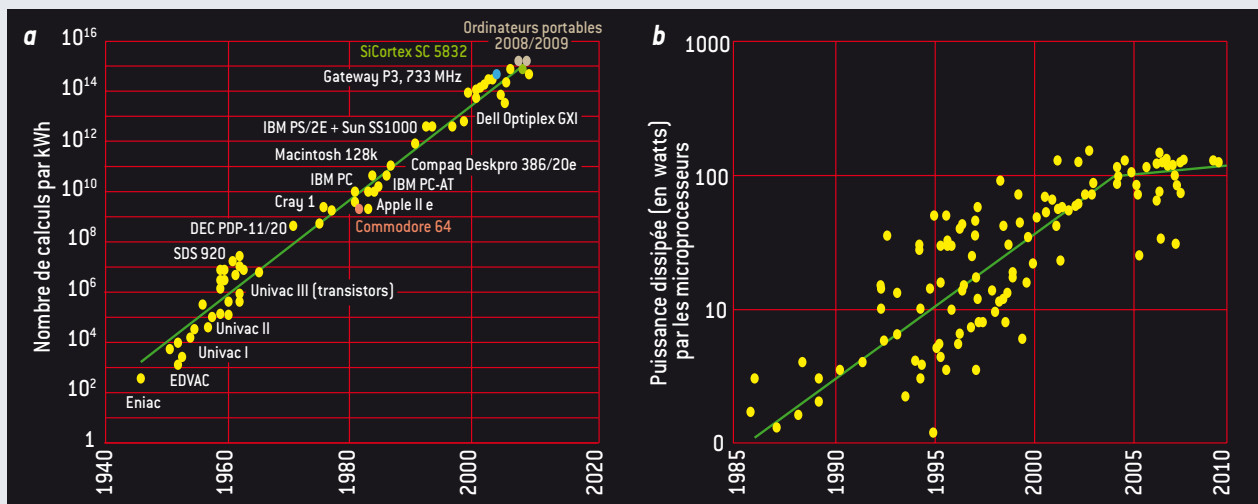
La loi de Koomey se réfère au nombre de calculs faits par unité d'énergie dissipée, nombre qui double à peu près tous les 1,57 ans depuis 1950 (a). Cet énoncé centré sur l'énergie et donc aussi sur l'échauffement produit par

les calculs est une reformulation pertinente, puisque plus régulière et précise, et puisqu'une part importante des problèmes de l'industrie des microprocesseurs est liée à des questions énergétiques. La vitesse de calcul des microprocesseurs est entravée par l'échauffement dû à l'effet Joule.

Par ailleurs, la commodité des dispositifs informatiques mobiles (ordinateurs portables, téléphones, tablettes) dépend des batteries, qui re-

présentent une part importante de leur prix et dont la capacité est toujours jugée insuffisante par les utilisateurs. Enfin, les microprocesseurs sont toujours plus gourmands en énergie (b). Les gros centres de calcul dénommés *datacenters* (comme ceux des firmes *Google*, *Facebook*, etc.) sont confrontés à des problèmes de consommation énergétique si importants qu'on choisit de les installer dans des régions froides ou bien là

où l'énergie est moins chère. Selon l'Université Stanford, la consommation des *datacenters* a augmenté de 56 % de 2005 à 2010 et elle représente aujourd'hui près de 1,5 % de la consommation mondiale d'électricité, soit l'équivalent de 30 centrales électronucléaires. Aux États-Unis, les *datacenters* consommeraient autant d'énergie que l'industrie automobile, d'après un article du *New York Times* (J. Glanz, 22 septembre 2012.)



quelques années. Cependant, dit-il, « si je devais engager un pari, je dirais qu'après, nous devons passer aux ordinateurs moléculaires et, peut-être beaucoup plus loin dans le cours du XXI<sup>e</sup> siècle, aux ordinateurs quantiques ». Or il s'agit de technologies qui ne semblent pouvoir aujourd'hui assurer la relève de l'électronique à silicium sur laquelle, depuis un demi-siècle, tous nos efforts ont été concentrés, sans vraiment préparer d'alternatives.

Linus Torvalds, l'acteur principal du développement de *Linux*, pense lui aussi que nous allons rapidement nous retrouver dans une situation totalement nouvelle en informatique quand la loi de Moore cessera de se vérifier et qu'alors nous devons apprendre à vivre autrement.

John Gustafson, architecte chargé de la conception et du dessin des produits de

la société AMD (seconde entreprise mondiale de production de microprocesseurs juste derrière *Intel*) est lui aussi formel et annonce que « vous assistez au début de la fin de la loi de Moore ».

Tout le monde n'est pas d'accord. Certains, comme Hans Moravec (roboticien, professeur à l'Université de Carnegie-Mellon), Raymond Kurzweil (inventeur et écrivain) ou John Smart (philosophe, futurologue et directeur de l'*Acceleration Study Foundation*) défendent qu'il y a toutes sortes de raisons de penser que la loi de Moore sous une forme généralisée restera vraie encore longtemps.

Ils évoquent les nombreuses pistes technologiques permettant de contourner les obstacles, comme déjà tant d'autres ont été contournés. Certes, une transition technologique sera prochainement

nécessaire. Ce qui semblait devoir ne durer que dix ans a duré plus de 40 ans et l'on peut envisager d'introduire des éléments moléculaires, optiques ou quantiques et les combiner et les intégrer aux éléments de silicium. N'y a-t-il pas encore de quoi maintenir le rythme plusieurs décennies ? Pourquoi ne pas croire que ce miracle se prolongera ? Les transitions technologiques passées, que ce soit le passage des calculateurs mécaniques aux calculateurs à relais, ou celui des calculateurs à relais aux calculateurs électroniques, ont à chaque fois accéléré le rythme des gains. Si nous tirons les leçons de l'histoire de l'informatique, nous devons donc non pas craindre la prochaine transition technologique, mais, au contraire, compter sur elle pour qu'elle maintienne, voire accélère, la dynamique du progrès.