

1. Le premier énoncé de la loi de Moore

Dans son article de 1965, Gordon Moore étudie l'évolution du coût par composant des puces dans la décennie qui précède. Il trace en particulier une courbe pour l'année 1962 et une autre pour l'année 1965 du coût par transistor en fonction du nombre de transistors sur une puce. Ce coût atteint un minimum pour 15 transistors en 1962, et pour 70 en 1965 (a). Par extrapolation, il propose le dessin de la courbe de coût qu'on peut espérer pour 1970. Il dessine aussi

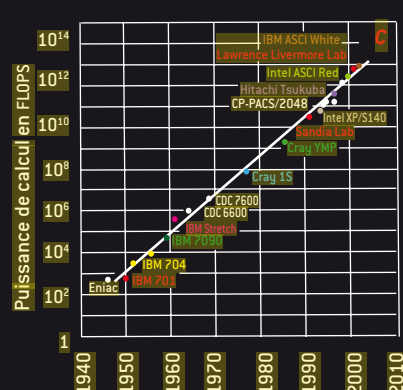
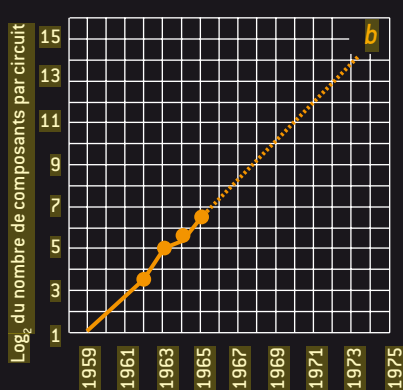
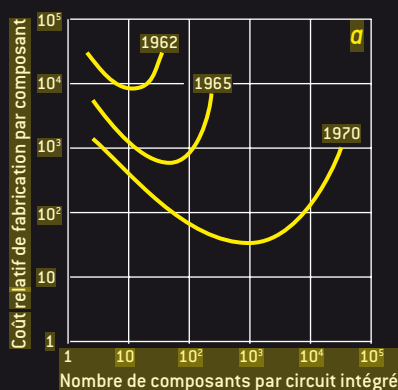
la courbe pour le nombre de composants par circuit, courbe qu'il prolonge en pointillés (b).

Dans son article, il écrit alors le premier énoncé de la loi de Moore : « La complexité pour le coût minimum s'est accrue d'environ un facteur 2 par an. À court terme, on a certainement raison d'espérer que cette vitesse se maintiendra et peut-être même augmentera. À plus long terme, ce rythme d'accroissement est moins certain, quoiqu'il n'y ait pas de raison de croire qu'il ne res-

tera pas à peu près constant pour au moins dix ans. D'ici 1975, le nombre de composants par circuit intégré de coût minimum sera de 65 000. »

C'était la naissance de la loi de Moore qui, dix ans plus tard, sera reformulée par G. Moore pour n'envisager qu'un doublement tous les deux ans. La loi est souvent présentée sous une forme moins précise qui annonce le doublement des performances informatiques tous les 18 mois. En voici un exemple. La courbe (c) représente la

performance maximale des ordinateurs les plus puissants entre 1950 et 2000 : durant ces 50 ans, la loi d'un doublement de puissance tous les 18 mois a été vérifiée. Nous sommes passés d'un peu moins de 1 000 opérations en virgule flottante par seconde (FLOPS) à 10^{13} FLOPS, soit un gain d'un facteur 10^{10} en 50 ans et donc un gain moyen d'un facteur 2 tous les 18 mois. Ces dix dernières années, un facteur supérieur à 100 a de nouveau été obtenu (non représenté sur la courbe).



Courbes c : d'après J. Koomey et al., IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33(3), pp. 46-54, 2011

2 600 000 000 transistors pour le 10 core Intel Xeon Processor E7 en 2013. Durant cette période de 42 ans, la miniaturisation électronique a donc progressé d'un facteur 1 130 000. Cela correspond à une multiplication par 1,942 tous les deux ans, conforme, à 3 % près, à la prévision de Moore de 1975 qui est donc vraie non pas sur 10 ans, mais sur 40. Notons que cette augmentation du nombre de transistors entraîne un progrès supérieur pour la puissance de calcul, car la vitesse d'horloge des microprocesseurs a elle aussi été augmentée.

Considérons un autre dispositif important en informatique, mais très différent des puces : les disques durs magnétiques qui servent de mémoire de masse à la plupart des ordinateurs. Prenons comme repère l'énorme disque dur IBM-2310 de 1964 qui avait une capacité de un méga-octet, soit un million de paquets de huit bits d'information ou un million de caractères, ou encore un

assez gros livre. Les disques d'aujourd'hui ont une capacité qui atteint et dépasse un téraoctet : 1 000 milliards de paquets de huit bits d'information, le texte d'un million de livres !

Un facteur un million en 40 ans

Il y a donc eu un progrès d'un million sur une période de 40 ans, soit exactement un doublement tous les deux ans. Comme le prix a considérablement baissé entre les deux repères envisagés, on arrive au doublement de performance tous les 18 mois annoncé par la loi de Moore générale. Sur la base de 10 000 dollars pour le prix du disque dur de 1964, contre 100 dollars pour un disque dur d'un téraoctet aujourd'hui, on arrive à un gain de 100 millions sur 40 ans, soit une performance multipliée par $1,995 \approx 2$ tous les 18 mois.

La loi de Moore générale affirmant un doublement de la performance tous les 18 mois ou tous les deux ans n'est pas métronomique : d'un secteur à l'autre, d'une période à l'autre, les variations sont parfois importantes. La comparaison des mémoires flash (utilisées dans les clefs USB, les téléphones portables et les tablettes) et des tailles d'écran (mesurées en nombres de pixels) illustre l'irrégularité de la loi.

De 2004 à 2012, la densité des circuits des mémoires flash a doublé tous les ans, dépassant largement les prévisions de la loi de Moore de 1975, et c'est à ce très rapide progrès qu'on doit les remarquables capacités de stockage des smartphones ou des tablettes et la fluidité de leur affichage. Concernant le nombre de pixels d'un écran couleur d'ordinateur portable, en revanche, on observe une évolution qui va de 640×400 pixels pour un ordinateur portable à écran couleur en 1993 (par exemple

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.

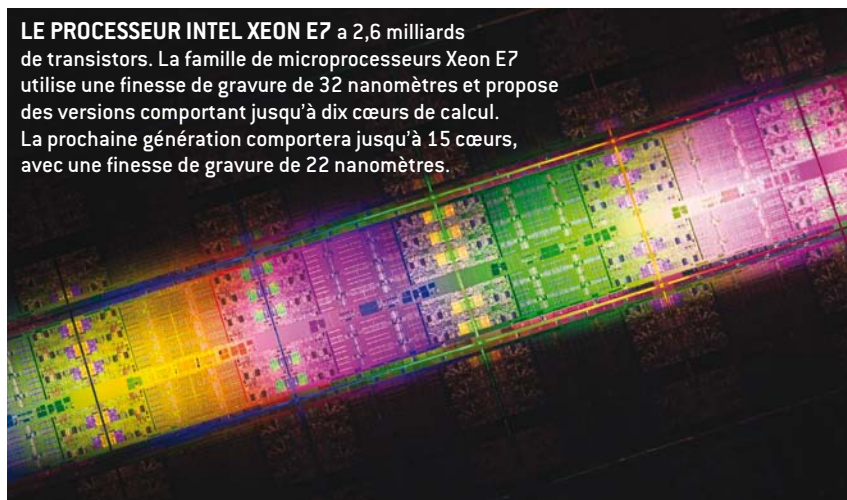
Nul ne conteste que la loi de Moore finira par se heurter à une barrière physique. Sans évoquer les limites extrêmes que les théoriciens de la mécanique quantique calculent, il est peu probable qu'on puisse stocker plus d'un bit d'information par atome de matière. Des limites économiques sont aussi à 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 indépassable 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.