

LOGIQUE & CALCUL

Au-delà de la loi de Moore ?

La loi de Moore est un cas de loi exponentielle empirique. Certains pensent que des lois de ce type déterminent notre avenir et sont une clef pour comprendre le passé.

Jean-Paul DELAHAYE

La formulation la plus courante de la loi de Moore indique que la puissance des dispositifs informatiques (pour un coût donné) double tous les 18 mois. Elle est assez bien vérifiée depuis plus de 40 ans, mais on annonce aujourd'hui que sa fin est proche. Depuis sa formulation dans les années 1960, il y a toujours eu des sceptiques pour mettre en doute sa validité. A-t-on aujourd'hui de meilleures raisons de penser qu'elle s'épuise et que nous vivons la fin d'une fantastique période qui a vu augmenter d'un facteur un million au moins les performances des technologies numériques (capacité de stockage, puissance de calcul, vitesse de transmission) ?

Les conséquences économiques d'une rupture de la loi seraient graves, tant l'industrie électronique est habituée à ce taux d'accroissement qui lui sert de base pour programmer son développement et décider de ses investissements, au point qu'on a dit de la loi de Moore qu'elle était une prophétie autoréalisatrice. Un ralentissement du progrès perturberait gravement le secteur, en faisant baisser le taux de renouvellement des PC et autres matériels électroniques – ce qui a peut-être déjà commencé.

On affirme aussi que la particularité de l'économie des ordinateurs n'est pas dans l'existence d'une telle loi exponentielle qui en décrit la dynamique, mais seulement dans le temps de doublement (18 mois) très court que l'on y observe. Une étude portant sur des dizaines de technologies montre que des variantes de la loi de Moore y ont

cours, avec des taux de croissance plus bas, mais des dynamiques exponentielles similaires. Il y aurait donc une loi générale affirmant l'existence d'une augmentation exponentielle des performances ou, ce qui revient au même, une décroissance exponentielle des coûts. Cette loi concernerait tous les secteurs économiques fondés sur des développements techniques.

Il est capital de mieux comprendre ces versions généralisées de la loi de Moore dont dépend l'avenir de notre monde. À côté des prévisions de science-fiction que certains tirent, une étrange variante de la loi de Moore apparaît à l'œuvre en biologie et concerne cette fois la complexité des êtres vivants. Même si elle est très discutée, les arguments présentés par Alexei Sharov en sa faveur sont assez soigneusement formulés. Ils conduisent à soutenir l'idée d'une croissance de type exponentiel de la complexité biologique et suggèrent une origine extraterrestre de la vie sur la Terre, idée ancienne déjà défendue par Francis Crick, l'un des découvreurs de la structure de l'ADN. Nous y reviendrons, mais auparavant, voyons ce que dit la loi de Moore et quelle a été sa validité passée.

En 1958, l'Américain Jack Kilby invente, ce qui lui vaudra de partager le prix Nobel de physique en 2000, le premier circuit intégré (on dit aussi puce électronique), qui est rapidement mis en production. Il s'agit d'un dispositif où sont reliés, sur une plaque, plusieurs composants élémentaires, essentiellement des transistors.

Le nombre de transistors qu'on réussit à placer sur une puce électronique augmente

avec régularité dès son invention. C'est en observant cette variation rapide et obstinée que Gordon Moore, l'un des fondateurs de la société *Intel*, formule l'énoncé initial de sa loi.

Diverses formulations

En 1965, il affirme qu'il y a chaque année un doublement de densité des transistors sur les puces et qu'il se prolongera au moins dix ans (voir la figure 1). En 1975, il ajuste sa loi et prévoit alors un doublement de densité tous les deux ans seulement, lui aussi annoncé comme devant se poursuivre une décennie. Traduite pour parler non plus de la densité des transistors sur une puce, dont l'utilisateur se moque un peu, la loi de Moore sous une forme plus vague, mais plus générale et donc plus intéressante, est l'affirmation suivante :

Tous les 18 mois, pour un prix donné, la puissance des dispositifs informatiques double.

La loi concerne aussi bien la capacité de stockage que la puissance de calcul ou la vitesse de transmission de l'information numérique. Puisqu'il y a 60 mois en cinq ans, le petit calcul $2^{60/18} = 10,08$ montre que cette affirmation générale équivaut à l'affirmation plus frappante encore que les performances informatiques sont multipliées par dix tous les cinq ans, et donc par 100 tous les dix ans, et par un million en 30 ans. Ces chiffres étonnants semblent irréels.

Considérons d'abord le nombre de transistors présents dans un microprocesseur. Nous sommes passés de 2 300 transistors en 1971 pour la puce *Intel-4004* à

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

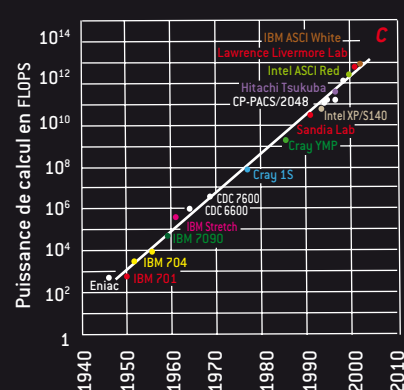
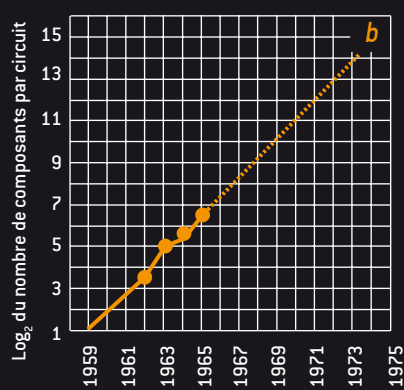
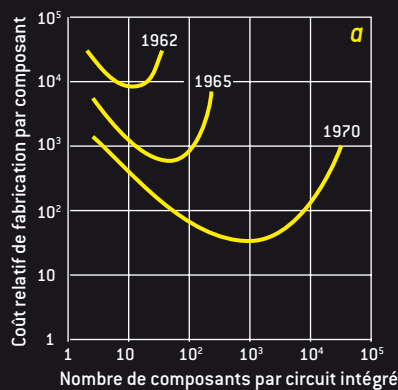
la courbe pour le nombre de composants par circuit, courbe qu'il prolonge en pointillés (b).

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