

LA LOI DE MOORE

Gordon E. Moore, futur co-fondateur d'Intel, fait partie de l'entreprise pionnière dans la fabrication de circuits intégrés lorsqu'en 1965 il écrit un article pour la revue Electronics Magazine. Il énonce l'affirmation suivante : la puissance des circuits intégrés double tous les ans. Son hypothèse est encore aujourd'hui un véritable métronome du progrès technologique. Il reviendra sur cette affirmation en évaluant sa prédiction à un doublement tous les deux ans. Cette hypothèse anticipe donc une augmentation exponentielle de la puissance de nos ordinateurs.

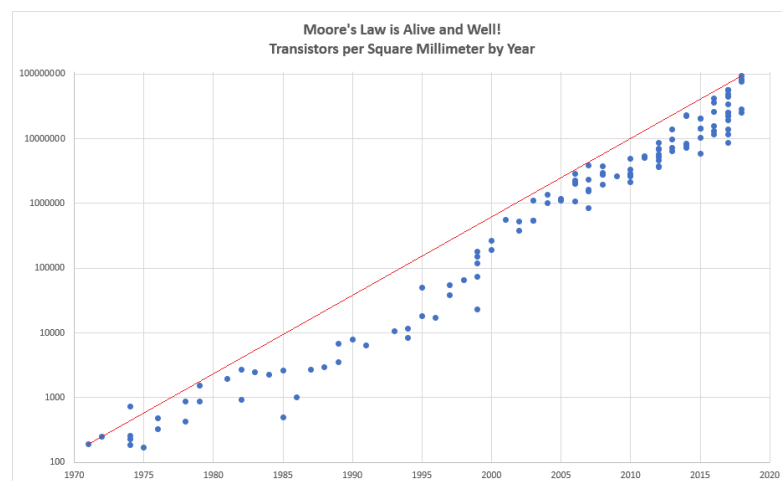
Cependant, pourquoi déclarer une telle affirmation ?

Tout d'abord, Gordon Moore constate que, depuis leur invention en 1959 par FairChild Semiconductor, la complexité des semi-conducteurs (leur finesse d'écriture déterminée par le nombre de transistors) doublait, il admet donc que cette augmentation fulgurante persistera dans les années à venir. Cependant, il reviendra en 1975 sur cette affirmation.

Par l'observation des données, telles que le coût des semi-conducteurs, il émet de nombreuses hypothèses concernant l'avenir. Il envisage d'ores et déjà l'invention des ordinateurs personnels, ordinateurs portables, et voyait un potentiel immense dans les communications téléphoniques via l'invention des téléphones portables !

Bien que la Loi de Moore pourrait sembler prophétique, Gordon E. Moore lui-même émettait des réserves concernant sa réalisation. Il se doutait que l'utilisation du Silicium persisterait étant donné son abondance et son coût dérisoire, ce qui permettrait un progrès constant et que la multiplication des transistors au mm^2 permettrait l'invention de médiums plus petits. Il considérait que le progrès technologique serait synonyme de miniaturisation de la technologie. Cependant, d'après lui, cette loi a des limites techniques liées à la taille des composants.

En effet, deux problèmes se dressent lorsque l'on crée des composants à une échelle atomique. Tout d'abord, le problème d'évacuation de la chaleur. Gordon Moore déterminait que si les transistors n'étaient espacés que de quelques atomes, la chaleur ne pourrait pas être évacuée. Ensuite, le comportement des électrons est instable et imprévisible ce qui rend les composants bien moins fiables et donc moins efficaces.



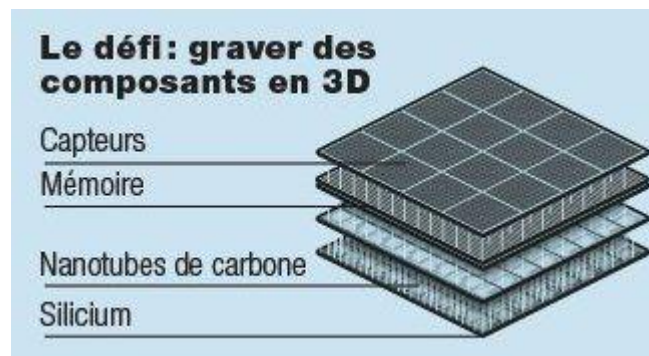
1. Transistors per Square Millimeter by Year, 1971–2018. Logarithmic scale. Data from Wikipedia. Chart by Eric Martin.

On comprend donc que la loi de Moore n'est pas éternelle, en 2020, le PDG de Nvidia a même annoncé qu'elle était morte !

Nous allons voir comment réagir face à l'arrivée imminente du « Mur de Moore ».

Plusieurs solutions techniques semblent envisageables afin de palier au « manque de place » dont souffriront les transistors sous peu.

Tout d'abord l'empilement des couches de circuits en trois dimensions. Actuellement, les circuits imprimés sont bi-dimensionnels, c'est-à-dire que, pour des raisons techniques nous travaillons sur des circuits imprimés avec une seule couche. Il s'agirait donc de graver plusieurs étages de composants sur une même plaque. Cette idée est l'objet de recherche de nombreux chercheurs. Bien qu'elle semble idyllique, elle est pour l'instant difficile à envisager pour un avenir proche. La raison principale est la suivante : il est très ardu de concevoir des circuits imprimés en trois dimensions à cause de la température de gravure des composants. En effet, il est nécessaire de graver à basse température les couches supérieures afin de ne pas brûler les couches inférieures.



2. Le Défi : graver des composants en 3D. © SOURCE : SHULAKER ET AL., 2017

Autre solution pour palier à la limite de la miniaturisation des composants : des circuits bidimensionnels mais cette fois avec des films minces semiconducteurs. Il s'agit de plaquettes de silicium d'un atome d'épaisseur sur lesquelles sont gravés les composants. Elles ont d'ores et déjà été réalisées, cependant la production est extrêmement complexe et onéreuse.

De nombreuses pistes sont à l'étude afin d'amener le hardware dans une toute nouvelle dimension et passer outre la Loi de Moore !

On pense notamment à un changement drastique de paradigme avec l'élaboration d'ordinateurs quantiques ou encore neuro-morphiques.

L'ordinateur quantique prend en compte des paramètres différents des ordinateurs traditionnels. A la place de traiter des 0 et des 1 (qu'on appelle bits), il traite une superposition de 0 et de 1 (quantum bit). Un ordinateur quantique serait capable d'utiliser les caractéristiques de l'infiniment petit à son avantage étant donné qu'à l'échelle quantique, les propriétés de la matière changent totalement ! Par conséquent, il est possible de se servir de ces spécificités comme l'aimantisation. Cependant les contraintes techniques des calculateurs quantiques sont immenses ! Pour fonctionner, si les ordinateurs quantiques utilisent des supraconducteurs, il faudrait prévoir une température proche du zéro absolu. Il existe des solutions alternatives pour un fonctionnement à température ambiante. Il est notamment possible de piéger des ions, cependant l'implémentation dans une puce est ardue.

Un ordinateur quantique a déjà été réalisé par la firme canadienne D-Wave. Malheureusement, à l'heure actuelle, l'ordinateur quantique présente des performances bien moindres que les plus puissants de nos supercalculateurs.

Les ordinateurs neuro-morphiques représentent une autre opportunité pour l'avenir. Il s'agit de reproduire la manière de fonctionner du cerveau afin de traiter des informations plus complexes et d'effectuer des opérations au-delà des opérations classiques. Pour cela, on s'inspire des réseaux de neurones du cerveau. Ces ordinateurs seraient donc parfaitement adaptés à l'IA. L'ambition serait de développer fondamentalement le Deep Learning et de rendre les ordinateurs bien plus efficaces en énergie. Le système Pohoiki Springs développé par Intel est une ébauche de ce que pourrait être un ordinateur neuro-morphique. Il est d'ailleurs capable de détecter certaines odeurs, le but de l'expérience serait d'aboutir à un système capable de sentir les odeurs de composés chimiques dangereux. Jusqu'à-là, les ordinateurs neuro-morphiques se spécialisent dans une tâche très précise.

Il reste donc de vastes dimensions à explorer afin de dépasser la loi de Moore et d'amorcer un progrès technique au-delà de l'indice simple de la densité de transistors. L'évolution du hardware a encore de beaux jours devant elle.

Autre alternative afin de dépasser le mur de Moore, voir le progrès technologique en termes de software et non plus de hardware notamment par le développement d'applications et du Cloud Computing. En effet, Gordon Moore avait envisagé la transformation des médiums informatiques mais n'avait pas anticipé les nombreuses fonctionnalités et applications que nous aurons aujourd'hui. Il s'agit là d'une dimension software qui n'est absolument pas abordée par l'ingénieur dans son article de 1965.

Cette vision du progrès est lancée par la stratégie « More Than Moore ». A titre de comparaison, Daniel Reed, computer scientist à l'Université de l'Iowa explique : « Pensez au milieu de l'aviation. Un Boeing 787 ne va pas plus vite qu'un Boeing 707, avion des années 1950s. Pourtant ils sont extrêmement différents. » Il affirme que l'innovation perdurera mais dans une dimension plus compliquée et plus nuancée que ce que modélise la Loi de Moore. Ajouter des fonctionnalités, développer des interfaces, développer la réalité virtuelle, il y a une multitude de pistes à envisager et étudier afin de faire avancer le monde de l'informatique. Même si le hardware atteignait ses limites dans les années à venir, une nouvelle ère commencerait, celle du software, celle du « More Than Moore ».

Nous avons vu les alternatives considérées afin de dépasser la Loi de Moore et d'envisager l'avenir. Nous allons maintenant aborder les critiques faites à la loi de Moore étant donné son essence et non pas ses limites techniques.

La Loi de Moore a été vivement critiquée notamment en raison de sa robustesse. L'objectif est d'observer la loi de Moore sous différents angles et d'envisager cette « prophétie » de l'évolution de l'industrie informatique comme une directive du progrès technique et non pas une prédiction.

Sacha Loebe s'est beaucoup attardé sur cette question dans son écrit « La Loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse ». D'après lui : « la Loi de Moore [...] n'est pas un énoncé identique à lui-même, mais une promesse constamment remixée, et dont le succès – l'histoire de sa « confirmation » – s'est construit au fur et à mesure. ». Il entend donc que ce n'est pas la Loi de Moore qui a prédit les avancées du domaine mais que ce sont les industriels qui s'y sont adaptés. Il explique également que les « modalités » de la Loi de Moore ont énormément changées depuis sa première énonciation par Gordon E. Moore en 1965.

Tout d'abord, il énonce le fait que Gordon E. Moore était un industriel, directeur de recherche et développement chez FairChild et voit dans cet article une opportunité pour Moore de renforcer le marché des semi-conducteurs afin d'en tirer potentiellement un avancement pécunier en cassant les prix et donc en développant le volume de ventes.

Ensuite, il émet l'hypothèse que ce sont les performances des entreprises qui modèlent la Loi de Moore et non pas l'inverse. La Loi de Moore apparaît donc comme un objectif à atteindre pour les industriels plutôt qu'une prédiction quasi parfaite. Afin d'appuyer cet argument nous pouvons présenter l'ITRS.

L'ITRS est l'International Technologies Roadmap for Semi-Conductors. Il s'agit d'un ensemble de documents produits à l'issue de réunions par des experts de l'industrie des semi-conducteurs d'une multitude de pays acteurs majeurs du domaine tels que le Japon, Taiwan, les Etats-Unis... L'objectif est d'organiser le progrès technique sur les années à venir. De construire un plan qui permettra des économies d'échelle. En effet, s'il fallait 100 composants pour créer un ordinateur entièrement nouveau et que seuls 99 étaient suffisamment avancés technologiquement, il serait impossible de monter cet ordinateur. Par conséquent, une collaboration est organisée afin d'avancer à un rythme déterminé sur des projets spécifiques et d'encourager une marche à suivre. Il se trouve que cette collaboration prend pour référence la Loi de Moore, en faisant un objectif à atteindre absolument. On peut donc aisément deviner que les performances seront à la hauteur de la Loi de Moore étant donné que c'est elle qui fait battre la mesure du progrès des industriels du milieu via la Roadmap de l'ITRS.

Autre critique avancée par Sacha Loebe, la Loi de Moore expliquerait l'obsolescence programmée et pas nécessairement les économies d'échelles. En effet, Moore soulevait le fait que le progrès technique serait vecteur d'économies d'échelle via la diminution des coûts de production des transistors. Cependant, on observe actuellement que les processeurs à leur sortie ont toujours le même prix. En effet, ils sont produits avec plus de ressources mais la planification du progrès technique fait que chaque génération de composant est obsolète dès sa sortie de l'emballage. En effet, on prévoit à l'avance un emploi du temps des sorties ce qui favorise une obsolescence programmée tout en ne garantissant pas des économies d'échelle. Par conséquent, le consommateur est délaissé au profit des entreprises.

On assiste donc à une modélisation de l'industrie de l'informatique comme bien jetable. Sacha Loebe critique vivement ce procédé, il pose donc la question suivante. Pourquoi ne pas arrêter de s'attacher à la Loi de Moore synonyme d'une promesse d'économie et plutôt développer une culture de l'innovation de l'ancien. D'après lui, la Loi de Moore doit être une vue comme une idole dont il est nécessaire de s'inspirer mais dont il faut se détacher afin construire un renouveau des technosciences bien plus sain.

Pour conclure, la Loi de Moore n'est pas qu'une simple prédiction empirique du progrès technique. Elle consiste à un ensemble d'hypothèses concernant l'avenir des technologies. Peut-être les industriels se sont-ils bien trop appuyés sur cette dernière pour élaborer le progrès. L'informatique a une multitude de facettes et aujourd'hui, nous assistons aux limites de la Loi de Moore, il sera donc nécessaire d'envisager un développement d'applications et de nouvelles dimensions à la fois du hardware et du software. Heureusement, l'innovation a encore de beaux jours devant elle.

Bibliographie

- Audétat, Marc, éd. 2015. *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses?* Paris: Hermann.
- Email, et Print. s. d. « La loi de Moore est morte, encore une fois. Et pour de bon ? » ZDNet France. Consulté le 3 novembre 2020. <https://www.zdnet.fr/actualites/la-loi-de-moore-est-morte-encore-une-fois-et-pour-de-bon-39879081.htm>.
- « Fonctionnement d'un ordinateur/Les transistors et portes logiques — Wikilivres ». s. d. Consulté le 9 novembre 2020. https://fr.wikibooks.org/wiki/Fonctionnement_d%27un_ordinateur/Les_transistors_et_portes_logiques#Les_transistors.
- « “Les grands mythes fondateurs” des nanos : la loi de Moore ou l’héritage du talk de Feynman de 1959 ». s. d. Consulté le 3 novembre 2020. <http://www.unit.eu/cours/enjeux-nanosciences-nanotechnologies/Module3-FR.pdf>.
- Loeve, Sacha. 2015. « La Loi de Moore : Enquête Critique Sur L’Économie D’Une Promesse ». M. Audétat, G. Brazzareti, G. Dorthé, C. Joseph, A. Kaufmann, D. Vinck (Eds.), *Sciences et Technologies Émergentes : Pourquoi Tant de Promesses ? Pp. 91-113*.
https://www.academia.edu/33208494/La_Loi_de_Moore_enqu%C3%AAtre_critique_sur_l%27%C3%A9conomie_dune_promesse.
- « More Than Moore, M. Mitchell Waldrop ». s. d. Consulté le 3 novembre 2020. https://www.nature.com/news/polopoly_fs/1.19338!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/530144a.pdf.
- Papon, Pierre. 2017. « La loi de Moore anticipe l’avenir de l’électronique ». *Futuribles* N° 417 (2): 79-84.
- Science-et-vie.com. 2019. « 1965-2020 : La loi de Moore est morte - Science & Vie ». 30 décembre 2019. <https://www.science-et-vie.com/science-et-culture/1965-2020-la-loi-de-moore-est-morte-53613>.