

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).

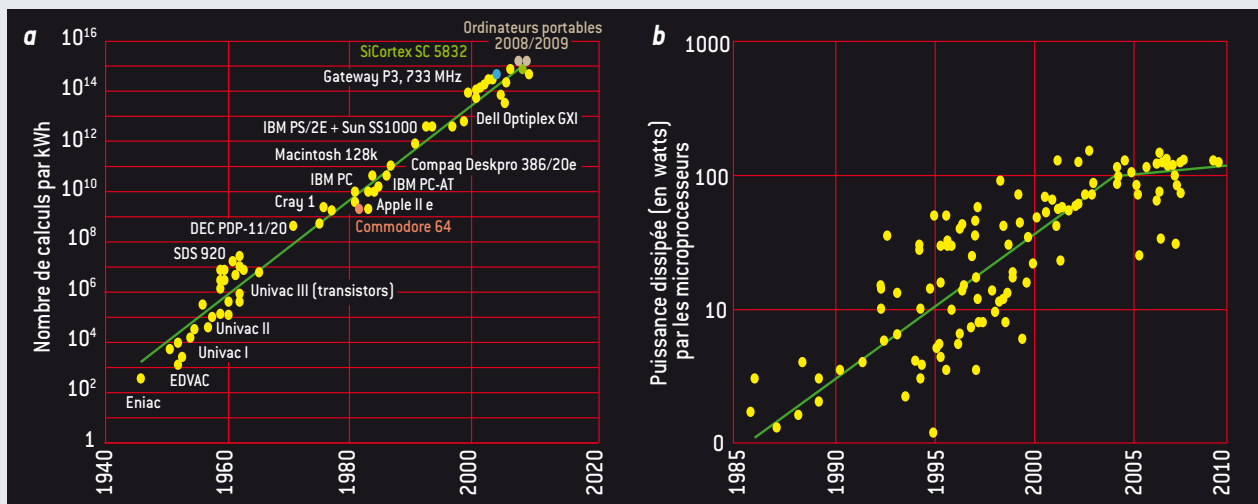
La loi de Koomey se réfère au nombre de calculs faits par unité d'énergie dissipée, nombre qui double à peu près tous les 1,57 ans depuis 1950 (a). Cet énoncé centré sur l'énergie et donc aussi sur l'échauffement produit par

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^e 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.

3. La croissance de la complexité du vivant

Alexei Sharov a proposé une méthode de mesure de la complexité (entendue comme richesse en fonctions et en organisation) à l'aide de l'évaluation de ce qu'il dénomme l'ADN fonctionnel non répétitif (en gros, les gènes et les séquences promotrices des gènes). Il obtient une courbe qui, en échelle logarithmique, est constituée de points assez bien alignés. Cette courbe, si on la considère comme repré-

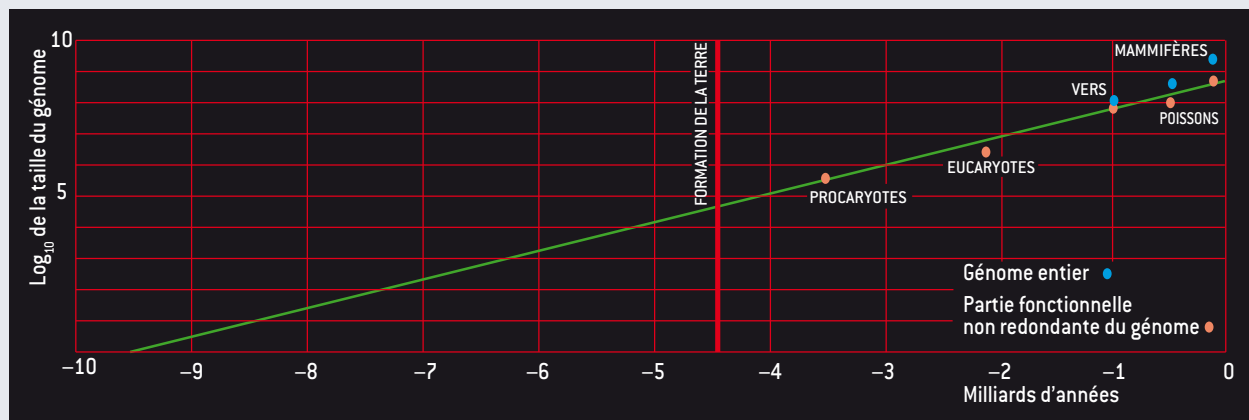
sentative d'une évolution de la complexité du vivant, signifie que celle-ci double tous les 350 millions d'années environ. C'est une sorte de loi de Moore pour la vie.

En prolongeant la courbe vers la gauche, elle touche l'axe des abscisses en un point correspondant environ à -10 milliards d'années, ce qui est plus ancien que l'âge de la Terre. On pourrait en conclure qu'il ne faut pas

prolonger la courbe et qu'il y a sans doute eu une phase où la croissance de la complexité a été plus rapide. A. Sharov préfère une autre explication de ce point d'intersection, selon laquelle la vie est arrivée sur la Terre avec une certaine complexité après son apparition ailleurs. Pour lui, le transport d'un point à l'autre de l'espace n'est pas le fait d'extraterrestres qui auraient ensemencé volontairement

la Terre (théorie de la panspermie dirigée), mais le résultat de déplacements – rares, mais possibles – de matière portant les structures moléculaires propres à la vie, par exemple sous la forme de spores résistantes.

Inutile de dire que les idées de A. Sharov ne font pas l'unanimité et que les spécialistes de l'origine de la vie y voient au contraire de nombreuses objections.



L'idée que l'avenir nous réserve une accélération du progrès produisant des doublages de plus en plus rapprochés des diverses mesures de performance de nos dispositifs numériques nous plonge dans des visions de science-fiction. On évoque la naissance de machines super-intelligentes contribuant elles-mêmes à la conception de nouvelles machines encore plus puissantes, etc.

De la science-fiction ?

Une volumineuse littérature futuriste s'est développée qui se plaît à discuter une loi « des retours accélérés » (due à R. Kurzweil), sorte de généralisation un peu imprécise de la loi de Moore à tous les domaines. Elle conduirait à un instant nommé « la singularité » (idée introduite par Vernor Vinge, professeur d'informatique à l'Université de San Diego) et pronostiqué avant la fin du XXI^e siècle, où l'intelligence humaine aura engendré des machines qui la dépasseront.

Heureusement (?), selon certains, nous pourrions alors transférer, télécharger, nos esprits dans ces machines, ce qui nous permettrait d'accéder à une forme d'immortalité. Une question vient naturellement à l'esprit : pourquoi ces machines nous accepteraient-elles en leur sein si nous leur sommes inférieurs et que nous ne servons plus à rien ? Bien d'autres questions sont abordées et débattues par ceux qui se nomment eux-mêmes « transhumanistes » ou « extropiens ».

Une idée développée par Hugo de Garis (chercheur en intelligence artificielle) évoque la survenue prochaine d'une inévitable et terrible guerre entre ceux qui s'opposeraient aux développements de cette intelligence nouvelle, qui condamne à terme les êtres humains, et ceux qui y verraient simplement la continuation de l'humanité sous d'autres formes matérielles. La question de savoir si les cyborgs, hybrides d'humains et de machines, seraient en mesure d'ouvrir une troisième voie est aussi posée et donne lieu

à de rudes controverses entre ces futurologues, parfois qualifiés de technoprophètes.

Parmi les pistes de réflexion, John Smart défend une idée inattendue. Non seulement les performances technologiques en général continueront de progresser, mais elles s'accompagneront d'une réduction des tailles, qui finira à long terme par rendre si petits les lieux où la vie se poursuivra dans ses formes nouvelles qu'elle disparaîtra du monde physique macroscopique. Cette idée résoudrait le paradoxe de Fermi : « Nous ne voyons pas les civilisations intelligentes qui devraient être apparues avant la nôtre et dont l'existence est pourtant probable, puisque la nôtre est assez récente en regard des durées astronomiques. »

Il existe aussi des spécialistes de l'histoire de l'économie et des techniques qui contestent que le progrès va en s'accélération. Ils tentent de montrer que nous sommes en train d'observer une baisse du rythme de l'évolution technique. Les difficultés rencontrées par l'industrie des microprocesseurs

redonnent de la crédibilité à leurs thèses. Théodore Modis et Jonathan Huebner, chacun par des méthodes différentes d'analyse historique et statistique des événements scientifiques et technologiques, affirment détecter une baisse ou l'esquisse d'une baisse de l'innovation depuis quelques années. Th. Modis, par exemple, conclut : « Nos analyses prévisionnelles montrent que nous sommes sur le point d'atteindre le taux maximal de croissance de la complexité générale, et que ce taux à l'avenir (qui est le taux de changement dans nos vies) sera en baisse. »

Le devenir de la loi de Moore, de ses variantes et de ses généralisations étant un sujet délicat et incertain, tournons-nous vers une autre réflexion qui, elle aussi, prétend nous éclairer sur des questions fondamentales, cette fois du passé, à l'aide d'une variante de la loi de Moore.

Loi de Moore... et origine de la vie

Alexei Sharov du Laboratoire de génétique des NIH (Instituts américains de la santé) a mené une série d'études et développé une méthode de mesure de la complexité fonctionnelle (selon ses termes) des diverses formes de vie sur la Terre au cours de l'évolution. La méthode qu'il met en œuvre pour mesurer la complexité des êtres vivants se fonde sur leur génome en n'en retenant que l'ADN non répété et fonctionnel.

La méthode est discutable et discutée par les spécialistes ; cependant, elle n'est pas absurde quand on la confronte aux idées que l'informatique théorique propose pour mesurer la complexité structurelle (voir cette rubrique dans le numéro de mai 2013). Comme A. Sharov, on considère que seule la partie non aléatoire d'une information doit être prise en compte dans une mesure de richesse en organisation.

A. Sharov remarque un alignement remarquable des points mesurant cette complexité structurelle du vivant lorsqu'on les dessine sur une échelle logarithmique en fonction du temps. Cet alignement signifie que la complexité des êtres vivants sur la Terre suit une sorte de loi de Moore. Cette

fois, le temps de doublement observé est 376 millions d'années ! La remarque, si elle est confirmée par des données complémentaires et validée par la communauté des spécialistes de l'évolution (ce qui n'est pas le cas aujourd'hui), serait très intéressante. Elle signifierait qu'il existe une loi générale de l'évolution indiquant non seulement que la complexité de la vie s'accroît, ce qu'on admet en général (avec quelques réticences pour certains), mais que cet accroissement, pour des raisons profondes sans doute, suit un rythme constant et continu.

Les propositions théoriques de A. Sharov deviennent hautement spéculatives quand il prolonge sa courbe en arrière dans le temps pour rechercher l'instant initial de cette apparition de la complexité des êtres vivants, assimilée à l'apparition de la vie. En effet, il découvre que cette origine se situerait à environ dix milliards d'années, donc avant la date de formation de la Terre estimée à 4,54 milliards d'années ! A. Sharov déduit de cette origine lointaine que la vie terrestre serait née ailleurs dans l'espace.

Remarquons que le point d'origine de la vie de A. Sharov est compatible avec l'estimation admise de l'origine des temps, le Big Bang dont on évalue la date à 13,82 milliards d'années. A. Sharov pense que les formes primitives de vie sont arrivées sur la Terre par accident. La vie aurait commencé ailleurs très progressivement (au rythme d'un doublement de complexité tous les 300 ou 400 millions d'années environ) et à l'occasion d'échanges accidentels de matière entre corps célestes, et se serait retrouvée sur la Terre, où la croissance de la complexité se serait poursuivie, toujours au même rythme (sans doute fixé par une loi que nous comprendrons plus tard) jusqu'à présent.

On le voit, l'observation des régularités dans l'évolution de la complexité des technologies ou de la vie (qui, à sa façon, est une technologie) est une remarquable source d'inspiration et d'argumentation pour ceux qui tentent d'entrevoir le futur ou de comprendre le passé. Écouter ces considérations n'oblige pas à en accepter sans réserve les sidérantes conclusions. Toutefois, ne refusons pas de nous poser la question : et si c'était vrai ? ■

■ L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

■ BIBLIOGRAPHIE

B. Nagy *et al.*, Statistical basis for predicting technological progress supporting information, *PLoS ONE*, vol. 8(2), e52669, 2013.

A. Sharov, Life before Earth, <http://arxiv.org/abs/1304.3381>

S. H. Fuller et L. I. Millett, The Future of Computing Performance, The National Academies Press, 2011.

J. Huebner, A possible declining trend for worldwide innovation, *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 72, pp. 980-986, 2005.

Th. Modis, Forecasting the growth of complexity and change, *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 69(4), pp. 377-404, 2002.

R. Kurzweil, The law of accelerating returns, www.kurzweil.ai.net/the-law-of-accelerating-returns, 2001.

G. Moore, Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics*, vol. 38(8), pp. 114-117, 19 avril 1965.

SCIENCE & FICTION

Des sauteurs hors compétition

Certains héros de la science-fiction, tel Hulk ou John Carter, accomplissent des sauts... défiant tant les lois de la physique que les contraintes anatomiques et physiologiques.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

De Hulk à John Carter, en passant par de nombreux Jedi ou mutants des X-men, les héros de science-fiction sont souvent des acrobates : pirouettes, saltos ou sauts démesurés, comment ces personnages sont-ils capables d'effectuer de telles voltiges ? Sur Terre, les animaux comme la sauterelle ou la grenouille nous permettent-ils de mieux comprendre ces mutants et autres acrobates extraterrestres ?

À la suite d'une expérience utilisant des rayons gamma ayant mal tourné, le physicien Bruce Banner subit d'importantes modifications génétiques. Depuis lors, sous l'effet de la colère ou d'une émotion forte, il perd le contrôle de lui-même et se transforme en Hulk, un humanoïde vert à la force décuplée et capable d'une extrême violence. Inspiré de *L'Étrange cas du docteur Jekyll et de Mr Hyde* de Robert Louis Stevenson (1886), ce personnage à la musculature hypertrophiée (ses habits, toujours les mêmes, se déchirent à chaque fois qu'il se transforme !) est capable de sauts vertigineux.

Dans l'adaptation cinématographique d'Ang Lee (2003), Hulk bondit de colline en colline dans le désert de l'Utah, franchissant plusieurs kilomètres à chaque pas ! Les bases de données Internet nous précisent même que le géant vert, dont la force peut augmenter à l'infini avec la rage, peut faire des sauts de 1 000 mètres en hauteur et de 20 kilomètres en longueur.

Voilà qui laisse rêveur quand on compare ces performances à celles des meilleurs humains. Le record du monde de saut vertical en détente est de 1,48 mètre et est

détenu depuis 2011 par le Danois Jonas Hussom. Même avec un bon élan et aidé d'une perche, le saut de 6,15 mètres effectué par l'Ukrainien Sergueï Bubka (record mondial depuis 1993) demeure très loin des performances de Hulk. Même chose pour le saut en longueur, dont le record mondial – 8,95 mètres – fut établi en 1991 par l'Américain Mike Powell.

De Hulk à John Carter

Si les chiffres avancés pour le superhéros donnent le vertige, sont-ils réalistes ? Même dopé aux rayons gamma, Hulk n'en demeure pas moins un humanoïde avec des os, des muscles, des tendons et devant respecter des contraintes physiques. Livrons-nous à un petit calcul : pour que Hulk puisse effectuer un « modeste » saut vertical de 120 mètres de hauteur par-dessus un building new-yorkais, il faut que sa vitesse initiale soit de l'ordre de 50 mètres par seconde. Sachant que la masse de ce gaillard d'environ 2,50 tonnes est estimée à 250 kilogrammes (et supposant que le saut dure trois centièmes de seconde), la force qu'il doit exercer au moment du bond doit être de l'ordre de 400 000 newtons. Cela correspond au poids d'une masse de 40 tonnes ou à une pression au niveau des pieds de l'ordre de trois millions de pascals (3 MPa), soit 30 fois la pression atmosphérique !

Si le béton de New York résiste à des pressions de dix millions de pascals, en pratique ce n'est le cas ni des os ni des tendons de Hulk, qui ne supporteraient probablement pas les contraintes imposées lors du décollage



L'INCROYABLE HULK est capable de bondir à un kilomètre de hauteur et sur 20 kilomètres de longueur. Sa constitution est certes extraordinaire, mais l'accélération due à de tels sauts devraient entraîner, notamment, un afflux de sang dans les pieds et, par conséquent, une absence préjudiciable de sang dans le cerveau, ainsi que diverses contraintes excessives sur les tendons et les os...