

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...

ou de l'atterrissage. Le calcul de l'accélération subie par son corps pendant l'impulsion initiale confirme cette impression : elle est de l'ordre de 170 fois l'accélération de la pesanteur terrestre (170g). Cette accélération extrême lors du saut devrait entraîner une accumulation du sang dans le bas du corps, de sorte que le cerveau cesserait d'être irrigué. C'est ce que les pilotes d'essais nomment le voile noir, une situation entraînant souvent, au-delà de 5g, une perte de connaissance. Dans la réalité, la physique impose ses lois !

Le cas de John Carter, autre héros de science-fiction créé par Edgar Rice Burroughs (également père de Tarzan) en 1912, et récemment adapté à l'écran (Andrew Stanton, 2012), semble différent. En pleine guerre de Sécession, cet officier sudiste se retrouve téléporté sur Mars (nommée Barsoom par ses habitants) où il devient une légende vivante : la gravité sur Mars, égale à 38 pour cent de celle ressentie sur Terre, lui permet d'effectuer des sauts et acrobaties impressionnants. Il est vrai que sur la Lune (où la gravité est six fois inférieure à celle de la Terre), les astronautes étaient aussi capables de sauts étonnants malgré leur scaphandre massif. La difficulté est que, sur Mars, John Carter est capable de faire des sauts de plusieurs centaines de mètres de haut, alors que la faible gravité martienne ne lui autorise que des performances trois fois meilleures que celles qu'il effectuerait sur Terre.

Sur Terre, les animaux se déplaçant par saltation peuvent-ils nous aider à mieux comprendre ces improbables rebondissements ? La petite gerboise (rongeur de 15 centimètres, capable de sauts en hauteur de 2,5 mètres) ou la sauterelle (qui saute 50 fois sa taille) arborent des pattes arrière longues et musclées, utiles pour propulser le corps. Celles du kangourou (capable de sauts de 3,5 mètres en hauteur et 13 mètres en longueur) sont repliées en Z et font office de ressort, alors que la queue robuste équilibre le corps lors du saut. Plus les jambes sont longues et musclées, plus le saut est puissant, mais plus le corps est lourd.

Pour minimiser cette contrainte de poids, d'autres innovations morphologiques ont été sélectionnées au cours de l'évolution. Ainsi, le puma (d'une détente de 5 mètres pour une masse de 60 kilogrammes) et la gazelle sud-africaine (capable de bonds de 15 mètres de long pour une masse de 40 kilogrammes) ont une colonne vertébrale compressible, augmentant ainsi l'élasticité du corps. La puce, qui saute facilement 100 fois sa taille



UN MUTANT HUMANOÏDE capable tout à la fois de sauter assez haut pour « décoller » et, après, de voler !

(l'équivalent d'une demi-hauteur de Tour Eiffel pour un être humain) et peut supporter 140 fois l'accélération de la pesanteur au décollage, est équipée d'une sorte de super-tendon entre les pattes arrière et le thorax. Ce tendon, constitué d'une protéine plus élastique que le caoutchouc, emmagasine de l'énergie élastique relâchée brutalement pour le saut, les pattes faisant office de levier.

Les trouvailles de l'évolution

Autre astuce pour sauter loin : développer diverses membranes, voiles et autres ailes, transformant ainsi le saut en vol plané ! Si les premières ailes sont apparues chez les insectes ou proches cousins, la première membrane volante a été développée chez les reptiles au moins 20 millions d'années avant les dinosaures. Comme aujourd'hui chez les lézards, marsupiaux et écureuils volants, cette membrane correspond souvent à une peau tendue entre les pattes avant et arrière. Mais elle peut aussi se glisser

entre les doigts, comme pour la grenouille d'Australie dont les palmures permettent des sauts sur 5 mètres, correspondant à plus de 180 mètres à notre échelle !

Plus étonnant encore, l'exocet, un poisson-volant, nous montre que l'on peut très bien sauter et voler sans avoir de pattes ! Et le petit coléoptère nommé « taupin » est sans doute le plus curieux : sur le dos, il est incapable de se retourner, de sorte qu'il effectue une torsion du thorax, emmagasinant de l'énergie élastique qui, quand elle est libérée, le propulse jusqu'à 25 fois sa longueur ! Ne retombant pas forcément sur ses pattes (contrairement aux chats ou autres félins) l'animal, qui subit au décollage une accélération de 380g, peut sauter en étant sur le dos. Ce dont Hulk est bien incapable ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr



ART & SCIENCE

L'Iliade, une œuvre un peu datée

Grâce à des méthodes issues de la génétique, on a pu dater l'épopée d'Homère : elle aurait été créée en 762 avant notre ère. Ce résultat est conforme avec les dates proposées par les historiens.

Loïc MANGIN

L'histoire de l'*Iliade* est connue. La guerre de Troie oppose depuis une dizaine d'années les Achéens, venus de Grèce, aux Troyens retranchés dans leur cité. L'origine en est l'enlèvement d'Hélène, la plus belle femme du monde et épouse du Grec Ménélas, roi de Sparte, par Pâris, un prince troyen à qui elle a été promise par Aphrodite. L'épopée narre six jours et six nuits de combats opposant les héros des deux camps, dont Agamemnon, Ulysse, Priam, Hector, Laocoon, Ajax et Achille (ces deux derniers sont représentés sur le vase de la page ci-contre, daté du VI^e siècle avant notre ère). Les dieux Zeus, Athéna, Apollon, Poséidon... tirent les ficelles en coulisses. Rappelons que le célèbre épisode du Cheval de Troie, qui mit fin au conflit, n'est pas dans l'*Iliade*. Il est brièvement décrit dans l'*Odyssée* et surtout développé dans l'*Énéide* de Virgile.

Plusieurs questions se posent à propos de l'*Iliade*. D'abord, la Guerre de Troie a-t-elle vraiment eu lieu ? Plusieurs auteurs classiques, tels Thucydide, Hérodote et Pausanias, le pensent, mais en font un événement historique de peu d'importance. À quelle époque ? Depuis l'Antiquité, la plupart des dates proposées la situent vers le XII^e siècle avant notre ère. Où s'est-elle déroulée ? En 1870, l'archéologue allemand Heinrich Schliemann a découvert les vestiges de Troie, sur le site d'Hissarlik, au Nord-Ouest de la Turquie.

Autre question : quand l'*Iliade* a-t-elle été écrite ? Mark Pagel, de l'Université de Reading, en Grande-Bretagne, et ses collègues ont récemment proposé une nouvelle date. Le récit aurait été écrit au milieu du VIII^e siècle avant notre ère, plus précisément vers -762. Cette étude est fondée sur une méthode originale, inspirée d'outils utilisés d'ordinaire en... génétique.

L'idée principale est que, à l'instar des espèces vivantes, les langues évoluent selon un processus de « descendance avec modifications ». Dans ce cas, il s'agit de repérer des mots homologues ou apparentés (les linguistes

L'analyse exclusivement linguistique de l'*Iliade* en situe la création vers -707. L'année -762 est plus plausible.

anglophones parlent de *cognates*) qui dérivent d'un ancêtre commun. Par exemple, les mots français *nuit*, anglais *night*, allemand *Nacht*, suédois *natt*, islandais *nótt*, sanskrit *nakt*, lituanien *naktis*... sont apparentés, car ils ont la même origine, en l'occurrence une racine indo-européenne notée **nók^{ws}*.

Outre ces évolutions graduelles, on observe aussi l'apparition de nouveaux mots qui en remplacent d'autres. En 2007, l'équipe de M. Pagel avait étudié de façon statistique ce phénomène au sein des langues indo-européennes. Pour ce faire, elle avait utilisé une liste de 200 termes établie au milieu du

XX^e siècle par le linguiste américain Morris Swadesh pour étudier la parenté des langues : ces mots, qui désignent des couleurs, des parties du corps, des relations humaines (père, mère...) ont la particularité d'avoir un équivalent dans chaque langue. En étudiant les ressemblances et les différences dans les diverses langues, on peut reconstituer l'histoire évolutive des langues. Les résultats avaient montré que la plupart des mots de Swadesh ont une probabilité de 50 pour cent d'être remplacés tous les 2 000 ans. Certains « vivent » moins de 1 000 ans, d'autres plusieurs millénaires.

Grâce à ces informations, la datation de l'*Iliade*, qui contient 173 mots de Swadesh, devenait possible. La langue d'Homère a ainsi été comparée au grec moderne et au hittite, une langue indo-européenne qui était parlée en Asie Mineure à l'époque de la guerre de Troie.

L'analyse exclusivement linguistique situe la création de l'*Iliade* à l'an -707, ce qui est conforme aux dates proposées par les auteurs classiques, tel Hérodote. En tenant compte d'autres sources d'information, notamment historiques, l'année -762 semble plus pertinente.

La linguistique s'accorde ainsi avec l'histoire et la littérature classique. Cependant, elle reste muette sur un autre grand mystère lié à l'*Iliade* : Homère a-t-il existé ? ■

E. L. Altschuler et al., *Linguistic evidence supports date for Homeric epics*, *Bioessays*, vol. 35, pp. 417-420, 2013.