

gramme court donnant s , mais ce que nous venons d'expliquer est l'essence de l'idée de la sophistication et de la complexité effective.

Ces définitions étant sans doute aussi naturelles que la définition de la profondeur logique de Bennett, la question était posée de savoir s'il existe un lien entre ces deux visions en apparence très différentes de la complexité structurelle. Une réponse a été donnée en 2010 dans un remarquable article de Nihat Ay, Markus Müller et Arleta Szkola, de l'Institut Max Planck de Leipzig. Ces chercheurs y établissent formellement qu'une grande complexité effective entraîne toujours une grande profondeur logique, confirmant donc le bien-fondé de la définition de Ch. Bennett.

Les recherches récentes ont conduit à un second progrès de la théorie, avec la mise au point de versions calculables de la profondeur logique. Ces versions font des hypothèses simplificatrices et restrictives sur les processus de calcul, mais aboutissent à des définitions débarrassées de la gênante incalculabilité de $P(s)$.

Un troisième motif de satisfaction pour ceux qui pensent que le concept de profondeur logique de Bennett ou les concepts voisins sont une clef pour comprendre le monde réel a été de le voir reconnu dans des travaux scientifiques liés à ce qui, dans le monde, est une sorte de grand calcul : l'évolution biologique.

Antoine Danchin, de l'Institut Pasteur, Guillaume Baptist, de l'Université de Grenoble, et John Collier, de l'Université de Durban en Afrique du Sud, défendent tous les trois indépendamment que la profondeur logique de Bennett permet d'éviter certaines considérations trop naïves sur la complexification des êtres vivants et éclaire l'idée d'un progrès dans les lignées d'organismes vivants, progrès qui ne serait que l'accumulation de résultats de calculs.

Divers travaux de nature expérimentale ont conduit à des débuts de validation pratique de l'idée de Ch. Bennett dont les fondements intuitifs ne font pas de doute, mais dont il restait à montrer qu'elle a aussi un potentiel d'application.

Un premier travail a consisté à mesurer vraiment le temps de calcul du plus court

programme produisant une image. Il a été mené par Hector Zenil, de l'Université de Sheffield, Cédric Gaucherel, du Département d'écologie de l'Institut français de Pondichéry en Inde, et moi-même. La méthode évalue le temps de décompression nécessaire pour des images représentant divers objets plus ou moins structurés. Ce temps de décompression est assimilable à $P(s)$, car le fichier compressé de s est une version approchée de s^* et le calcul pour passer du fichier compressé au fichier complet est assimilable au calcul que s^* effectue pour produire s , c'est-à-dire $P(s)$.

Expérimentations

Les résultats de ces mesures de temps de calcul ont été utilisés pour ordonner les images par complexité structurelle croissante (voir l'encadré page ci-contre). La classification obtenue est proche de celle attendue, avec au début les images parfaitement simples ou totalement aléatoires, et à la fin du classement les images des objets les plus riches en structures.

Un second travail fondé sur l'énumération massive de petites machines de Turing a été mené par Fernando Soler-Toscano, de l'Université de Séville, H. Zenil, Nicolas Gauvrit, de l'Université Paris VII, et moi-même. Il a permis d'évaluer la complexité de Kolmogorov et la profondeur logique de Bennett pour de courtes séquences de 0 et de 1. Ces calculs montrent, comme on s'y attendait, que les deux notions de complexité sont indépendantes et que la profondeur logique de Bennett est faible aussi bien pour les suites simples (dix fois 0, par exemple) que pour les suites d'apparence aléatoire.

L'idée de la complexification, objet de nombreux commentaires et d'autant de spéculations, devient ainsi un thème scientifique et mathématique fondé sur une théorie générale rigoureuse et qui, dans les cas les plus simples, produit des outils de mesure. On peut même rêver d'aboutir à une compréhension théorique profonde du développement de la complexité de l'univers et du vivant, qui rendrait définitivement caduques les élucubrations des créationnistes et de l'*Intelligent Design*. ■

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

- H. Zenil, J.-P. Delahaye et C. Gaucherel, *Image characterization and classification by physical complexity*, *Complexity*, vol. 17(3), pp. 26-42, 2012.
- N. Ay et al., *Effective complexity and its relation to logical depth*, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 56, pp. 4593-4607, 2010.
- J.-P. Delahaye, *Complexité aléatoire et complexité organisée*, Quæ, 2009.
- Ch. Bennett, *Logical depth and physical complexity*, dans *A Half-Century Survey on the Universal Turing Machine*, pp. 227-257, Oxford University Press, 1988.
- M. Koppel, *Complexity, depth, and sophistication*, *Complexity*, vol. 1, pp. 1087-1091 1987.

SUR LE WEB

- F. Soler-Toscano et al., *Correspondence and independence of numerical evaluations of algorithmic information measures*, 2012 : <http://arxiv.org/abs/1211.4891>
- Ch. Bennett, *What increases when a self-organizing system organizes itself? Logical depth to the rescue*, 2012 : <http://dabacon.org/pontiff/?p=5912>
- P. Grassberger, *Randomness, Information, and Complexity*, 2012 : <http://arxiv.org/abs/1208.3459>

SCIENCE & FICTION

Fascinants cousins

Les primates sont fréquents en science-fiction, bons ou méchants selon les auteurs, souvent géants. Peut-on établir une phylogénie de ces primates, fruits de l'imagination ?

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

« **O** te tes mains, sale humain » avertit le colonel Attar, puissant gorille dans la version de 2001 de *La Planète des singes* de Tim Burton. Ce renversement de situation résume bien le thème central du roman éponyme de Pierre Boulle (1963). Grand classique de l'anticipation, ce roman décrit une Terre du futur où les singes ont pris le pouvoir, réduisant les humains au rang de fugitifs, de jouets ou d'esclaves.

Cette parabole, magnifiée à l'écran par les somptueux maquillages de John Chambers, nous renvoie le regard que nous posons sur nos cousins primates. Effet boomerang d'autant plus perturbant que les singes ont joué ou jouent encore, dans nos sociétés dites modernes, le rôle de « cobayes » pour la conquête de l'espace ou la médecine. Entre mutants surdoués et surpassant les hommes, ou monstres primitifs, violeurs de blondes ou dévoreurs d'aventuriers, les primates de la science-fiction ne refléteraient-ils pas nos peurs ancestrales et nos fantasmes ?

Darwin avait raison : l'homme ne descend pas du singe, il partage avec lui un ancêtre commun. Cette relation, qu'il consigne notamment dans *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe* (1871), a transformé nos rapports avec les animaux en général et les autres primates en particulier. Elle met aussi en cause notre conception linéaire de l'évolution – qui va de la bactérie jusqu'à l'homme – pour la remplacer par une autre

plus réaliste, buissonnante et aléatoire, dont il traite déjà en 1859 dans *De l'origine des espèces*. Rappelons que parmi tous les êtres vivants, les singes sont nos plus proches cousins : nous partageons avec les bonobos et les chimpanzés près de 99 pour cent de notre génome. À tel point que nous pourrions presque parler d'espèces sœurs. C'est bien cette proximité génétique qui en fait, hélas pour eux, d'excellents cobayes...

À qui la première place ?

Comment définir un primate ? Le terme a été créé en 1758 par Linné, naturaliste suédois et père d'une classification du vivant : il est issu du latin *primas* « celui qui occupe la première place », car l'homme était alors placé au sommet de l'échelle des êtres organisés. Le groupe comprend aujourd'hui environ 424 espèces de mammifères placentaires généralement couverts de poils (sauf sur le derrière), ayant des ongles, un pouce opposable, des yeux (dans ce groupe, la vision binoculaire est plus sollicitée que l'olfaction) ainsi qu'un assez gros cerveau.

Le groupe, autrefois plus diversifié, serait apparu juste avant ou après l'extinction des dinosaures non aviens. Parmi les primates, les orangs-outans (genre *Pongo*), gorilles (*Gorilla*), chimpanzés et bonobos (*Pan*) ainsi que les humains (*Homo*) sont regroupés dans la famille des hominidés – les trois derniers dans la sous-famille des



1. Dans *La Planète des singes : les origines* (Rupert Wyatt, 2011), des expérimentations médicales, réalisées sur des chimpanzés, tournent mal...

homininés. Notons que le genre *Homo* a été nommé en 1758 par Linné lui-même, bien avant le genre *Pan* (1816). Or, selon le principe d'antériorité (le premier genre nommé a priorité sur les autres), et en raison de la proximité entre ces espèces, chimpanzés et bonobos devraient s'appeler respectivement *Homo troglodytes* et *Homo paniscus*.

Si tel n'est pas l'usage, considérer le singe comme une autre humanité est pourtant assez fréquent en science-fiction : dans son roman *Congo*, Michael Crichton (1980) met en scène une nouvelle espèce de gorilles intelligents, au langage complexe et reclus dans la jungle africaine. Autre exemple : dans sa nouvelle *In The Abyss* (1896), H. G. Wells imagine également une civilisation de singes aquatiques, avec des ouïes au niveau des oreilles. Cette idée rappelle une théorie farfelue, mais très en vogue dans les années 1960, selon laquelle l'homme moderne aurait connu une phase en milieu marin ou côtier...

Quelle phylogénie pour King Kong?

En science-fiction, nos cousins ont souvent des tailles et des proportions exagérées. Mais même le plus grand, King Kong, apparu pour la première fois en 1933 dans le film d'Ernest Schoedsack et Merian Copper, est doué de sentiments humains puisqu'il tombe amoureux de la belle Ann Darrow. En cela King Kong est une relecture du mythe de la belle et la bête. Mais, même si la taille, qui varie souvent d'un plan à l'autre, diminue au cours de l'histoire du cinéma, on peut se demander d'où vient ce gigantisme : dans un documentaire-fiction accompagnant le *remake* de 2005 de Peter Jackson, King Kong est décrit comme un genre et une espèce à part entière, *Megaprimatus kong*, qui dériverait du gigantopithèque.

Ce nom, s'il fait très scientifique, est-il réellement approprié ? Certes le gigantopithèque a bel et bien existé : il s'agit d'un primate fossile connu par des dents (dont les premières ont été découvertes chez un apothicaire chinois !), des mâchoires et quelques os exhumés en Asie du Sud-



2. LE GIGANTOPITHÈQUE fut-il un cousin éloigné de King Kong ?

Est et en Inde, datés entre neuf millions d'années et 100 000 ans. Haut de quelque trois mètres, il serait à l'origine du mythe du yéti. Toutefois, le gigantopithèque serait plus proche de l'orang-outan que du gorille. King Kong n'a donc pas grand-chose à voir avec ce pithèque, contrairement au *Big Foot* nord-américain ou autre dérivé tout aussi imaginaire que le yéti.

Les proportions et la morphologie de Kong suggèrent tout simplement qu'il s'agit d'un gorille, sans doute le dernier représentant de formes géantes qui se seraient retrouvées isolées sur Skull Island. Dans ce contexte d'isolement géographique et génétique, nous proposons que King Kong soit nommé *Gorilla giganteus*. Un tel isolement peut en effet produire des formes aussi bien géantes (chez les rongeurs par exemple) que naines (tels les éléphants nains fossiles retrouvés sur les îles grecques – et dont le crâne, présentant une impressionnante fosse nasale, serait à l'origine du mythe du Cyclope). Mais il est vrai que l'on croise nombre de créatures anachroniques sur Skull Island, dont des dinosaures...

Si King Kong demeure le primate le plus célèbre de l'histoire, d'autres singes fantastiques, moins connus, méritent pourtant

toute notre attention : c'est le cas de ces surprenants orangs-outans de l'espace inventés par l'agronome Pierre Boitard (1789-1859). Dans ses *Études astronomiques* (1838-1840), ce naturaliste créatif et avant-gardiste imagine pour la première fois à quoi pourraient ressembler les habitants du Système solaire. Il met en scène des espèces peuplant chaque planète selon l'échelle des êtres organisés adoptée à l'époque. Ainsi, de haut en bas de l'échelle, le Soleil est habité par de petits « superhumains » macrocéphales (qui préfigurent les extraterrestres à grosse tête), la Terre par l'homme, Vénus par « une certaine figure de l'homme fossile », enfin Mercure est peuplée d'orangs-outans.

Du chef de guerre Attar de *La Planète des singes* aux primates extraterrestres de Boitard, nos cousins nous fascinent. Pour savoir pourquoi, il nous suffit de nous regarder dans un miroir ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Avec la participation de Vilem Bischof, spécialiste en primatologie.

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



ART & SCIENCE

La crucifixion : un supplice éternel !

La position des crucifiés perturbe, entre autres, l'activité des nerfs de l'avant-bras et entraîne une disposition particulière des doigts que l'on retrouve dans la plupart des représentations artistiques.

Loïc MANGIN

En 71 avant notre ère, 6 000 esclaves furent crucifiés et alignés sur la *Via Appia* qui relie Rome à Cappoue. Le général romain Crassus entendait ainsi marquer sa victoire sur la révolte dirigée par le gladiateur thrace Spartacus. Cet épisode, relaté par l'historien Appien et rendu célèbre par le film éponyme de Stanley Kubrick en 1960, montre que le crucifiement était un supplice répandu chez les Romains. Il l'était déjà chez les Perses, qui l'auraient inventé au V^e siècle avant notre ère, mais aussi chez les Celtes, les Scythes, les Assyriens, les Phéniciens...

Le châtiment devint célèbre lorsqu'il fut la sentence prononcée par Ponce Pilate à l'encontre de Jésus : c'est plutôt dans ces circonstances que l'on parle de *crucifixion*. Certains situent la première représentation de la crucifixion dans les *Évangiles de Rabula*, un manuscrit enluminé de la fin du VI^e siècle

et conservé à Florence : c'est, en tout cas, la première scène complète figurant la plupart des protagonistes. D'autres observateurs ont vu des crucifixions dans des mosaïques orientales du IV^e siècle, d'autres encore dans une petite plaque d'ivoire d'époque mérovingienne gravée au début du V^e siècle. Quoi qu'il en soit, la crucifixion a fait les riches heures de l'histoire de l'art : Mantegna, Raphaël, Velasquez, Dali...

Ce supplice a soulevé plusieurs questions. La victime meurt-elle d'asphyxie ou d'une défaillance cardiaque ? Des expériences menées en 1989 par Frederick Zugibe (des volontaires sont restés longtemps sanglés à des croix) n'ont pas permis de conclure. Les clous étaient-ils plantés dans la paume ou au niveau du poignet ? Des études archéologiques ont plaidé pour la seconde hypothèse : les clous étaient insérés entre le radius et le cubitus.

Une autre question a longtemps été délaissée. Elle concerne la position des doigts. En

effet, sur de nombreuses crucifixions, notamment celle du Greco (*voir page ci-contre*), on observe que le pouce et l'index sont tendus, l'auriculaire et l'annulaire complètement pliés, tandis que le majeur est dans une position intermédiaire. Cette disposition anatomique fut représentée la première fois à Constantinople, à la fin du VIII^e siècle. Comment l'expliquer ? S'agit-il d'une licence artistique – cette posture des doigts est celle utilisée par les prêtres lors de bénédictions – ou correspond-elle à une réalité biologique ? Jacqueline Regan, du Département de neurosciences de l'Hôpital *Inova Fairfax*, à Falls Church, aux États-Unis, et ses collègues ont répondu.

Un clou planté dans la paume ou dans le poignet, en endommageant les nerfs et les muscles à cet endroit, n'entraînerait pas une telle disposition des doigts. Selon les médecins, la cause est à chercher dans un dysfonctionnement des nerfs plus en amont dans le bras. Voyons comment.

Chez un crucifié, les bras forment chacun un angle d'environ 135 degrés avec l'axe du corps et subissent une rotation vers l'avant tandis que les coudes sont hypertendus. De plus, les bras supportent le poids de l'individu suspendu. Dans cette position, une contrainte mécanique importante s'exerce sur le nerf médian qui parcourt le bras (*voir la figure ci-contre*). Cette contrainte se traduit par une diminution de l'afflux sanguin vers ce nerf, donc de son activité. Plusieurs expériences sur des animaux ont confirmé ce lien.

