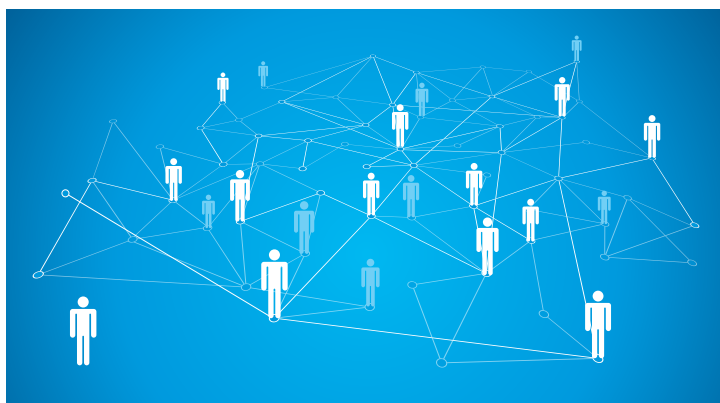




LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

L'ACCÈS AU RÉSEAU, UN DROIT FONDAMENTAL?

En mettant en ligne certains services, l'État et les entreprises réalisent des économies. Celles-ci devraient servir à financer l'accès au réseau de ceux qui n'en ont pas les moyens.



De plus en plus de services sont disponibles uniquement en ligne. Comment lutter contre l'exclusion de ceux qui n'ont pas accès au réseau ?

Cinquante ans après la création du réseau Internet, presque 50% de la population mondiale l'utilise régulièrement, et cette proportion dépasse 90% dans certains pays, comme la Norvège ou le Royaume-Uni. De ce fait, ne pas avoir accès à un ordinateur, une tablette ou un téléphone connectés au réseau, ou ne pas savoir se servir d'un tel objet, devient un handicap. Ainsi émerge l'idée de faire de l'accès au réseau un droit fondamental.

Donner à chaque humain un accès au réseau a cependant un coût. Si l'accès au réseau devenait un droit fondamental, comment financer les programmes qui rendraient ce droit effectif? En fait, certaines particularités des réseaux constituent une corne d'abondance pour un tel financement.

Pour le comprendre, imaginons qu'Alice et Béchir aient accès à un réseau quelconque. Donner aussi à Chan accès à ce réseau permet non seulement à Chan de communiquer avec Alice et Béchir, mais également à Alice et Béchir de

communiquer avec Chan. Ce n'est donc pas uniquement Chan qui profite de cette opération, mais aussi Alice et Béchir.

Plus généralement, si un réseau permet à n personnes de communiquer et si la valeur, pour une personne, de pouvoir communiquer avec une autre personne est une constante c , alors la valeur de l'accès à ce réseau, pour chaque personne

Donner accès au réseau à une nouvelle personne profite à tous

qui y a accès, est $c(n-1)$. Soit, pour l'ensemble de ces personnes, une valeur de $cn(n-1)$. Comme le remarquait Robert Metcalfe, cette valeur est proportionnelle non pas au nombre n de nœuds du réseau, mais au nombre $n(n-1)$ de ses liens orientés, c'est-à-dire au carré du nombre de ses

nœuds. Donner un accès au réseau à une nouvelle personne augmente donc cette valeur de $2cn$. Le premier cn correspond à la valeur de l'accès pour cette nouvelle personne, en mesure désormais de communiquer avec les n personnes qui avaient déjà accès à ce réseau, et le second à l'augmentation de la valeur de l'accès pour ces n personnes, qui peuvent communiquer avec une personne de plus. Ainsi, donner accès à un réseau à une nouvelle personne profite à tous. Il y a donc un intérêt à financer l'accès au réseau de cette nouvelle personne, quand celle-ci n'a pas les moyens de le faire.

Par exemple, les services en ligne permettent aux banques de réduire leurs coûts, car elles n'ont plus besoin d'avoir une agence dans chaque petite ville. Mais ces services augmentent les coûts pour les clients de ces banques, qui ont alors besoin d'un accès au réseau pour effectuer des opérations sur leur compte. Ce transfert de coût n'est pas dans l'intérêt de ces clients, mais il n'est pas non plus dans l'intérêt des banques elles-mêmes, si elles perdent leurs clients non connectés. Il est donc dans l'intérêt des banques de participer à ces programmes d'accès universel au réseau, qui leur permet de réduire leurs coûts tout en gardant leurs clients.

De même, l'informatisation de l'administration permet à l'État de réduire ses coûts. Avant chaque élection, nous recevons, par la poste, les professions de foi de chaque candidat. Mettre ces documents en ligne permettrait d'éviter l'envoi de millions de courriers. Cependant, les principes de la démocratie exigent que, avant que nous cessions d'envoyer ces courriers, chaque citoyen ait accès au réseau.

Comme pour les banques, les économies réalisées par l'État pourraient être réinvesties dans des programmes d'accès universel au réseau. Ainsi, l'accès universel au réseau se distingue des – tout aussi importants – autres droits fondamentaux, tels l'accès universel à l'eau, au total, ou au logement, en cela qu'il ne coûte rien. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

CE N OANIMISME QUI VIENT

Le procès intent   à propos d'un selfie de macaque reflète
l'essor d'une vision anthropomorphique du monde.



L'un des selfies
pris par Naruto,
le macaque
nègre qui
s'est saisi
de l'appareil
de David Slater.

Il est certain que les animaux ne sont pas les machines organiques qu'avait imaginées Descartes; il est non moins vrai qu'ils ressentent la douleur, ont des émotions et que certains sont dotés de compétences cognitives que les hommes ont longtemps sous-estimées. Gr ce à l'éthologie contemporaine, les frontières étanches que l'histoire des idées a construites entre les humains et le reste du monde animal sont devenues poreuses. De cette porosité relative, certains en ont conclu abusivement que les humains étaient des animaux (ce qui est vrai) comme les autres (ce qui est douteux).

Cette conclusion a conduit récemment certaines associations à réclamer des droits pour les animaux que personne ne songeait à leur accorder hier encore. De ce point de vue, l'aventure mondialement connue de David Slater a connu en septembre dernier un dénouement fascinant. Ce Britannique, photographe professionnel, est parti il y a quelques années en mission sur l' le indonésienne de Sulawesi où vivent les macaques nègres (*Macaca nigra*),

une espèce menacée d'extinction. L'un de ces animaux lui subtilisa son appareil photo et prit quelques clichés. Lorsque David Slater récupéra son appareil, il eut la surprise de voir que certaines de ces photos étaient réussies.

L'affaire aurait pu s'arrêter là, mais il se trouve qu'une de ces photos – un selfie hilarant (*ci-dessus*) – a eu un succès mon-

**Bientôt des droits
pour les plantes et pour
les robots?**

dial et la question s'est posée de savoir si les droits d'auteur devaient revenir à l'homme ou au macaque. Peta, une association américaine de défense des animaux, a engagé des actions en justice et a fini par conclure un accord à l'amiable avec le photographe: 25% des droits générés par l'image seront versés à des œuvres desti-

nées à protéger les milieux de vie de ce singe et d'autres macaques indonésiens.

Faut-il vraiment octroyer aux animaux des droits d'auteur? Et faut-il encore aller plus loin? C'est ce que pense par exemple le neurobiologiste italien Stefano Mancuso, qui réclame des droits pour les plantes cette fois! Dans l'ouvrage *Verde brillante*, il invite à élargir notre conception de l'intelligence et à considérer que les végétaux, qui réagissent à leur environnement et ont parfois des stratégies pour contrer les prédateurs, n'en sont pas dépourvus. Dans ces conditions, ne devraient-ils pas aussi bénéficier de cette extension de la prise en compte des droits du vivant?

Stefano Mancuso compare même l'arborescence des racines des arbres à Internet. Ce qui résonne avec un autre aspect étonnant de cette extension: certains exigent   présent des droits pour les robots et les intelligences artificielles.

C'est le cas de Kate Darling, par exemple, une chercheuse au MIT. Certes, elle ne réclame que des droits de «second ordre» pour nous protéger des sentiments que nous pourrions ressentir à la vue de la maltraitance d'un robot humanoïde. Mais qui sait jusqu'où pourrait conduire ce raisonnement, à l'heure où une partie de la planète semble persuadée qu'aux  tats-Unis, un robot s'est «suicidé» dans un centre commercial en se «jetant» dans une fontaine artificielle?

Depuis la nuit des temps, l'homme adore conférer des  mes aux éléments de son environnement, mais l'histoire des idées avait peu à peu vidé l'univers des esprits dont l'imagination humaine l'avait peuplé. Ce n oanimisme qui conduit à le remplir de nouveau est donc surprenant, d'autant que ceux qui sont à la manœuvre ici et réclament des droits pour les animaux, pour les plantes (et peut-être bientôt pour les minéraux) revendiquent souvent, parallèlement, un retrait global de l'homme. Ils aspirent à une moindre empreinte de notre espèce dans notre environnement et ne paraissent pas se rendre compte que leur manœuvre aboutit à une anthropomorphisation du monde. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



40 ANS DE DÉCOUVERTES

De nos jours, la science avance à un tel rythme qu'aucun humain n'est capable de suivre l'ensemble des découvertes qui s'égrènent de jour en jour et d'année en année. *Pour la Science* a cependant voulu offrir à ses lecteurs, à l'occasion de son quarantième anniversaire, un panorama synthétique des avancées les plus marquantes des quatre dernières décennies.

Le choix fut difficile et suscita de longues discussions à la rédaction. La découverte du prion est-elle plus importante que l'identification du virus du sida? La démonstration du théorème de Fermat est-elle plus fructueuse que celle de la conjecture de Kepler sur l'empilement de sphères?... Le résultat de nos délibérations se traduit dans les 86 pages suivantes que vous lirez, nous l'espérons, avec plaisir. Avant d'aborder (*page 104*) une instructive réflexion sur l'âge de *Pour la Science*, qui n'est pas forcément donné par le nombre 40... Bonne lecture!



- La **cryptographie à clé publique** voit le jour [p. 23](#)
- Naissance en Angleterre de Louise Brown, le premier **bébé-éprouvette**
- Première observation directe de l'**augmentation de la concentration de CO₂** dans l'océan
- On découvre **des fossiles de bactéries** vieux de 3,4 milliards d'années
- Mise en évidence par Mitchell Feigenbaum, Pierre Coulet et Charles Tresser d'une propriété d'**universalité dans les systèmes dynamiques chaotiques**

- Klaus von Klitzing met en évidence l'**effet Hall quantique entier**
- L'assemblée de l'OMS déclare la **variole éradiquée**
- Alan Guth publie sa théorie de l'**inflation cosmique**
- Sur la base de traces géologiques, des chercheurs affirment que l'**extinction des dinosaures est due à la chute d'un astéroïde** [p. 28](#)

1978

1980

1977

1979

1981

- On identifie une troisième forme de vie aux côtés des eucaryotes et des bactéries : les **archées**
- On remarque que l'ADN comporte des séquences non codantes, que l'on nommera **introns**, intercalées entre les régions codantes, les **exons**
- Commercialisation des **premiers ordinateurs personnels**
- Walter Gilbert et Fred Sanger développent chacun une méthode de **séquençage de l'ADN** [p. 20](#)
- Kenneth Appel et Wolfgang Haken prouvent le **théorème des quatre couleurs** [p. 23](#)

- **Modification génétique de bactéries** pour qu'elles produisent de l'insuline
- Premières observations de l'effet de **lentille gravitationnelle**
- Daniel Kahneman et Amos Tversky publient un article fondateur de la « **théorie des perspectives** » [p. 24](#)

- Le centre médical de l'université Stanford réussit à faire une **transplantation cœur-poumon**
- Commercialisation de l'IBM-PC et du **premier ordinateur portable**, l'Osborne 1
- Des **cellules souches** embryonnaires de souris sont cultivées
- Le **vaccin contre l'hépatite B** est approuvé aux États-Unis
- Le physicien suisse Heinrich Rohrer et le physicien allemand Gerd Binnig construisent un **microscope à effet tunnel**



Wikimedia Commons

1986

- Les expériences d'Alain Aspect et ses collègues démontrent la **violation des inégalités de Bell** par la physique quantique **p. 30**
- Découverte de la bactérie ***Helicobacter pylori***, puis de son rôle dans l'ulcère de l'estomac
- Les entreprises Sony et Philips lancent le **CD audio**
- L'équipe de Stanley Prusiner découvre un nouveau type d'agent infectieux impliqué dans des maladies neurodégénératives, les **protéines prions**

- Jean Morlet et Alex Grossmann posent les bases de la technique mathématique d'**analyse par ondelettes**
- Premières découvertes de **quasi-cristaux**
- Un premier gène contrôlant l'**horloge circadienne** est identifié chez la drosophile

- Mise au point d'un procédé d'amplification de l'ADN, la **PCR** (Polymerase Chain Reaction)
- Découverte de l'**apoptose**, ou mort cellulaire programmée, et de gènes impliqués dans ce processus
- Rendez-vous de la sonde Giotto avec la **comète de Halley**

NASA/ESA/Giotto Project

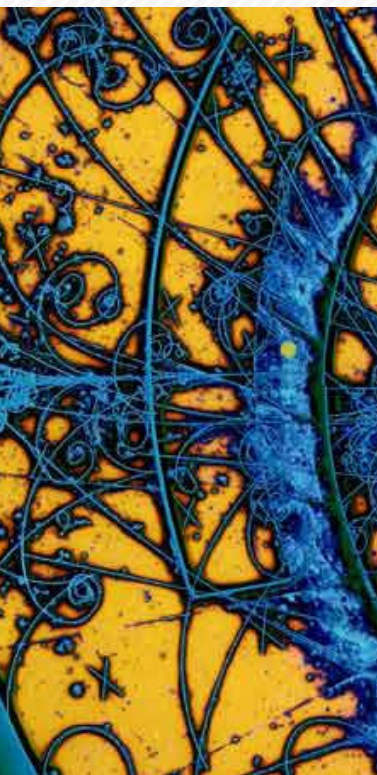
1982

1983

1984

1985

1986

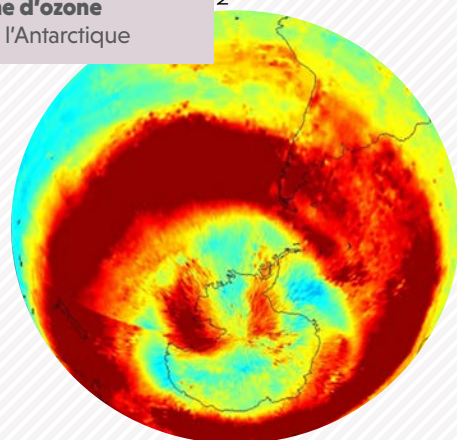


Cern/BEBC

- Mise en évidence des **bosons W et Z** au Cern **p. 34**
- Le **virus du sida** est identifié **p. 35**
- Découverte de l'**homéoboîte**, une séquence d'ADN commune à un ensemble de gènes et essentielle au développement embryonnaire **p. 35**
- Le tabac, première **plante génétiquement modifiée**
- Fin de la démonstration du **théorème de classification des groupes finis simples**

- Les **fullerènes**, nouvelle forme du carbone **p. 36**
- Généralisation des systèmes de **calcul formel** tels que Maple
- Découverte du **trou dans la couche d'ozone** au-dessus de l'Antarctique

Nasa/JPL



1977 Premier génome séquencé

La saga de l'ADN

En 1977, il fallait plusieurs mois, grâce à une toute nouvelle technique, pour décrypter les onze gènes d'un petit virus de bactérie. Bientôt, les séquenceurs analyseront un génome humain en quelques heures.

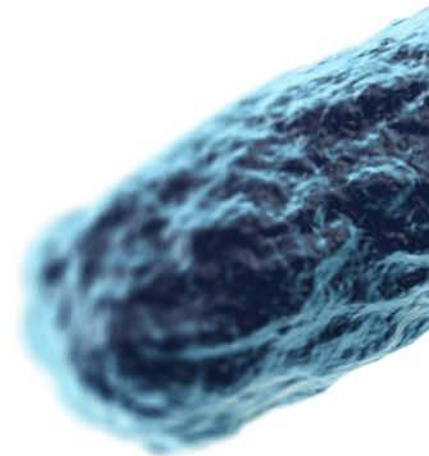
Le génome du phage phiX174 ne comptait que 5386 nucléotides (les constituants de l'ADN) et 11 gènes – rien à côté des génomes analysés aujourd'hui. Pourtant, le séquençage de ce virus bactérien en 1977, au prix de plusieurs mois de travail, fit sensation. Il prouvait que des outils existaient enfin pour lire l'ADN. Pour comprendre à quel point ces outils étaient attendus, il faut remonter bien plus tôt.

La compréhension des mécanismes de l'hérédité ne date pas des seuls travaux, fussent-ils remarquables, du moine autrichien Gregor Mendel. Comme toute science, la génétique s'est construite pas à pas, à partir de connaissances acquises depuis des siècles par les «hybrideurs» et par la montée en puissance des méthodes statistiques. Ainsi, Mendel, en utilisant des petits pois, put travailler sur de très grands échantillons. Ses plans expérimentaux, conçus avec rigueur, lui permirent d'établir, en 1865, ses fameuses lois qui définissent la manière dont les caractères héréditaires sont transmis d'une génération à l'autre. Ces résultats ne furent à l'époque ni compris ni acceptés. Ils furent redémontrés trente-cinq ans plus tard chez d'autres plantes, mais aussi la drosophile, puis la souris.

L'avènement de la génétique moderne ouvrait des questions fondamentales: quel support moléculaire était responsable de ces mécanismes? Quelle était la nature biochimique du système d'information du vivant? Comment fonctionnait-il? Comment se transmettait-il à la génération suivante? De nombreuses hypothèses furent émises au début du xx^e siècle dans un climat passionné. On touchait là au cœur même de la vie, au cœur de nos origines, de notre identité, de l'unicité de chacun. Après la démonstration que ce système d'information est véhiculé par les chromosomes, deux expériences princeps, très élégantes, identifièrent la nature de la molécule support de l'hérédité.

L'ADN, SUPPORT DE L'HÉRÉDITÉ

En 1928, Frederick Griffith, microbiologiste anglais, recherchait un vaccin contre le pneumocoque. Il avait à sa disposition deux souches, l'une mortelle chez la souris, l'autre non virulente. S'inspirant des travaux de Pasteur, Griffith injecta aux souris des bactéries non virulentes vivantes ou des bactéries virulentes tuées par la chaleur. Aucune de ces préparations ne tua les souris. En revanche, injectées successivement ou ensemble, elles provoquaient leur mort. De plus, les bactéries non virulentes, devenues alors mortelles, transmettaient désormais ce caractère de



L'AUTEUR



PIERRE TAMBOURIN
biologiste, directeur
général de Genopole,
à Évry, de 1998
à 2017 et membre
de l'Académie
des technologies

virulence à leur descendance: un facteur «trans-formant» passait de la souche virulente tuée à la souche inoffensive et modifiait l'hérédité de ces bactéries. L'expérience fut reprise en 1944 par Oswald Avery, Colin MacLeod et Maclyn McCarthy, de l'institut Rockefeller, à New York. Ils substituèrent aux bactéries virulentes tuées des extraits hautement purifiés de ces bactéries tueuses (protéines, lipides, capsules, acides nucléiques). Le facteur modificateur de l'hérédité était présent seulement dans l'extrait ne contenant que des acides nucléiques, essentiellement de l'acide désoxyribonucléique ou ADN.

À cette époque, l'ADN était déjà bien connu, mais sa constitution – la répétition de quatre éléments – paraissait beaucoup trop simple pour qu'il joue un rôle dans l'hérédité de ces bactéries. On supposait qu'il contribuait à l'architecture des chromosomes, à l'instar de l'actine dans le squelette des cellules. De plus, on ignorait que l'ADN était présent dans la plupart des microorganismes. La grande richesse et la complexité du monde des protéines paraissaient bien mieux correspondre à l'extraordinaire variété du vivant.

LECTURE RAPIDE

Séquencer 3 milliards de bases, taille du génome humain, équivaut à déchiffrer, lettre à lettre, un livre de format A4 d'environ 450 000 pages ! À la vitesse de 10 éléments par seconde, la lecture prendrait 10 ans, alors qu'une cellule réplique, en le lisant, son génome en quelques heures, à la vitesse prodigieuse de 170 000 nucléotides par seconde via un processus hautement parallèle.

Un chromosome humain, de quelques micromètres de long, est constitué d'un brin d'ADN de quelques centimètres compacté. Chaque chromosome (ici une paire) compte entre 50 et 200 millions de paires de nucléotides.

Ce fut donc un tollé quasi général et Avery n'obtint jamais le prix Nobel ! Il fallut l'intervention des physiciens du «groupe des phages» (Alfred Hershey, Max Delbrück, Salvador Luria), un réseau informel de scientifiques, et leurs remarquables travaux pour clore le débat sur la nature de la molécule support de l'hérédité.

Ce pas décisif franchi, de nombreux laboratoires se mirent à étudier l'ADN et examiner les innombrables questions qui se posaient, dont la première – sur sa structure – reçut une réponse dès 1953 (James Watson, Francis Crick) : l'ADN est une double hélice souvent très longue, de quelques milliers à plusieurs milliards d'éléments, composée de quatre bases (A, C, T, G) organisées de manière linéaire précise, suggérant un système de codage de l'information en base 4. Cette structure en double hélice, constituée de deux brins d'ADN complémentaires, suggérait aussi un mécanisme de perpétuation de cette molécule au cours des générations successives. Ce travail exceptionnel fut récompensé du prix Nobel dès 1962. Au cours des décennies suivantes furent élucidés la structure fine des gènes >

> «normaux», la nature des lésions pouvant altérer leurs propriétés, la régulation de leur expression, le système de codage gènes/protéines, la réplication, etc. Progressivement, les liens entre la génétique et le monde du gène s'établirent, en particulier dans deux domaines de la médecine, les maladies rares et le cancer. L'ADN devint la vedette d'innombrables colloques et publications et la source de nombreux prix Nobel.

C'est aussi au cours de ces recherches que furent identifiées des molécules pouvant servir dans une ingénierie de l'ADN (enzymes de restriction, ligase, transcriptase inverse, PCR et, récemment, CRISPR-Cas9...). Progressivement, une caisse à outils très performante a permis l'essor, d'une part, d'une biologie moléculaire fondamentale où l'on isole, amplifie, caractérise un gène ou modifie le génome d'une cellule, d'un organe ou d'un organisme et, d'autre part, du génie génétique à vocation plus appliquée, en particulier *via* la création d'entreprises de biotechnologie. Des molécules-médicaments comme l'insuline, puis des anticorps, impossibles à synthétiser par voie chimique, devenaient aisés à produire industriellement par voie biologique grâce au caractère universel de l'ADN (un fragment d'ADN extrait d'une espèce peut être lu et utilisé par une autre espèce). Les expériences princes de Griffith, Avery et leurs collègues avaient montré la voie.

L'ÈRE DE LA GÉNOMIQUE

Il devint vite assez évident qu'une clé pour comprendre la machinerie du vivant, et en particulier l'évolution de l'ADN selon les espèces, résiderait dans notre capacité à déterminer l'ordre des éléments constitutifs d'un fragment et, mieux, d'un génome complet. Séquencer l'ADN devint un enjeu critique. De plus, la taille de nombreux génomes imposait de disposer de méthodes simples et rapides. Deux furent proposées dans la deuxième moitié des années 1970, l'une par le Britannique Frederick Sanger (déjà Prix Nobel en 1958 pour son travail sur la structure de l'insuline), l'autre par l'Américain Walter Gilbert. Et c'est ainsi qu'en 1977 fut séquencé le génome du phage. La méthode Sanger était née !

Ce premier génome était petit, mais l'ambition de séquencer des génomes plus complexes se fit jour au début des années 1980 et, en 1985, quelques scientifiques proposèrent de séquencer le génome humain. Ce projet pharaonique pour l'époque (durée prévue : 15 ans, coût : 3 milliards de dollars) démarra en 1990, associa 16 laboratoires dans le monde, dont le Genoscope d'Évry, et s'acheva en 2003 (en fait 2006). Au cours de cette période, les performances du séquençage ont évolué de manière fulgurante. Aujourd'hui, le séquençage d'un génome humain se fait en quelques jours – demain en quelques heures – pour 1000 dollars. Dès lors, la connaissance d'un génome humain complet peut entrer dans la

pratique hospitalière de routine. C'est l'objectif du plan France Médecine Génomique 2025, lancé le 22 juin 2016. Répartis sur douze plateformes régionales, les moyens techniques permettront dans cinq à sept années de séquencer plusieurs centaines de milliers de génomes en cancérologie et dans le domaine des maladies rares, puis dans tous les secteurs médicaux qui le nécessitent. Une nouvelle médecine dite de précision se dessine ainsi, où les technologies du numérique permettront d'intégrer toutes les données cliniques d'un patient et de comparer son dossier à des milliers d'autres afin d'affiner le diagnostic et le choix du traitement.

La génomique a par ailleurs ouvert des portes dans de nombreux secteurs et est d'ores et déjà

Le Beagle s'appelle aujourd'hui Tara

à l'origine d'une bioéconomie qui bouleverse les modèles économiques et modifie les rapports de force entre pays. L'industrie pharmaceutique s'est investie dans les sciences du vivant pour utiliser des médicaments biosourcés ou produire des molécules chimiques complexes par biologie de synthèse, notamment en immunothérapie des tumeurs. La biotechnologie environnementale joue un rôle considérable dans la politique de développement durable. Décontamination des sites pollués, traitement et recyclage des déchets et des odeurs, traitement de l'eau, surveillance des agents pathogènes dans l'environnement font appel à des approches génomiques pour optimiser les procédures ou identifier les gènes et voies métaboliques impliqués. Agroalimentaire et agronomie, énergie et matériaux biosourcés, plastiques biodégradables, pâtes à papier, textiles, chimie verte constituent autant de domaines enrichis par l'apport des «omiques», que les techniques de synthèse de génomes ou de réécriture de séquences *in vivo* vont encore accélérer en posant de redoutables problèmes éthiques !

La métagénomique, inventaire des micro-organismes d'écosystèmes jusque-là totalement inconnus, nous ramène à l'époque des grandes explorations. Le *Beagle* s'appelle aujourd'hui *Tara*. Cette goélette parcourt les océans, collecte des échantillons de plancton et établit une cartographie mondiale de la répartition des micro-organismes marins – tout en participant à la surveillance des écosystèmes maritimes et à la lutte contre le réchauffement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

International Human Genome Sequencing Consortium, **Finishing the euchromatic sequence of the human genome**, *Nature*, vol. 431, pp. 931-945, 2004.

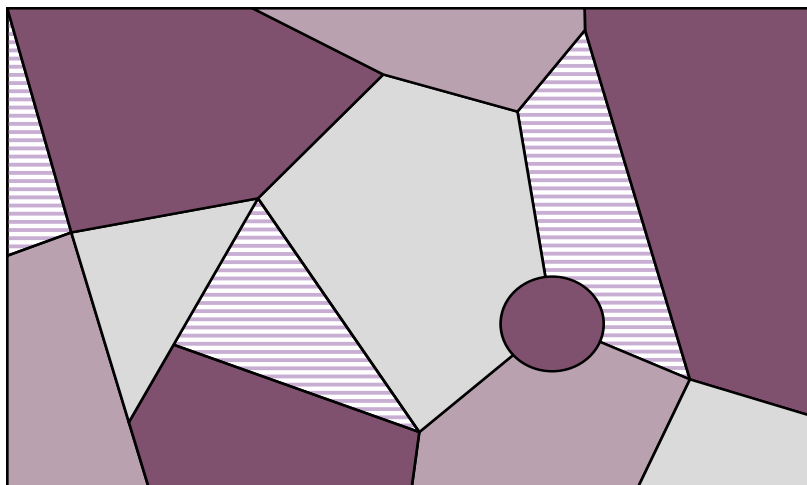
F. Sanger et al., **Nucleotide sequence of bacteriophage phiX174 DNA**, *Nature*, vol. 265, pp. 687-695, 1977.

LE THÉORÈME DES QUATRE COULEURS EST DÉMONTRÉ

En 1852, Francis Guthrie, mathématicien et botaniste sud-africain, a postulé que quatre couleurs suffisent à colorier n'importe quelle carte plane en s'assurant que deux pays ayant une frontière commune soient de couleurs différentes. Le résultat semblait d'autant plus évident que, bien souvent, trois couleurs suffisent et que, en 1890, une preuve simple a été trouvée pour cinq couleurs. Pourtant, pendant près d'un siècle, toutes les preuves que quatre couleurs suffisent se sont révélées fausses.

En 1977, à la suite des travaux de l'Allemand Heinrich Heesch, Kenneth Appel et Wolfgang Haken, de l'université de l'Illinois, ont démontré que s'il devait y avoir un contre-exemple, il appartiendrait à un ensemble de 1936 cas « critiques » possibles (plus tard réduit à 1478). Ils ont alors écrit un programme informatique qui a réussi – en tâtonnant – à colorier ces 1936 cas avec quatre couleurs seulement : une vérification impossible à la main et qui a pris à l'époque plus de 1200 heures de calculs ! Le théorème des quatre couleurs était donc démontré ? À voir...

Ce tout premier cas de preuve informatique consistant non pas à prouver un théorème par le raisonnement, mais à tester puis à rejeter un



nombre fini mais colossal de contre-exemples fit scandale à l'époque. En 2005, Georges Gonthier et Benjamin Werner, à l'Inria (Institut national de recherche en informatique et automatique), ont reproduit les résultats d'Appel et Haken à l'aide d'un logiciel assistant de preuve (où le raisonnement est formalisé dans ses moindres détails, de telle façon qu'il soit vérifiable par tous), mettant ainsi fin à la polémique. L'informatique est devenue depuis un outil légitime de la recherche et de la formulation de preuves en mathématique. ■

RENÉ CUILIERIER
journaliste scientifique

K. Appel et W. Haken, *Illinois Journal of Mathematics*, vol. 21, pp. 429-490, 1977

Quatre couleurs suffisent pour colorier une carte de telle sorte que deux pays ayant une frontière commune soient toujours de couleurs différentes (en supposant que tous les pays sont faits d'un seul morceau, sans enclave).

LA CRYPTOGRAPHIE À CLÉ PUBLIQUE VOIT LE JOUR

Depuis l'Antiquité, pour échanger des messages secrets, il fallait au préalable que l'auteur et son destinataire se mettent d'accord sur une méthode de chiffrement. Hélas, si un tiers interceptait cet échange, leurs efforts de discrétion étaient réduits à néant.

En 1976, Whitfield Diffie et Martin Hellman, alors à l'université Stanford, ont proposé l'idée d'une « cryptographie à clé publique » ou « asymétrique ». Une analogie l'illustre. Alice (le destinataire) envoie à Bernard (l'émetteur) un coffre ouvert (la clé publique) dont elle seule a la combinaison (la clé secrète). Bernard introduit le message dans le coffre, le ferme et le réexpédie à Alice qui est alors la seule à pouvoir y accéder, quand bien même le coffre serait intercepté avant

1 024

C'EST LE NOMBRE DE BITS QUI CODENT LES PLUS PETITES CLÉS PUBLIQUES ACTUELLES. CELA CORRESPOND À DES NOMBRES D'ENVIRON 256 CHIFFRES DÉCIMAUX.

de lui parvenir. Whitfield Diffie et Martin Hellman n'avaient pas donné d'algorithme mettant ce principe en pratique, mais, en 1978, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman y sont parvenus à partir de résultats de la théorie des nombres, ce qui a donné l'algorithme RSA. La fonction publique f qui produit le message chiffré, $f(M)=C$, est choisie de telle façon que f^{-1} , sa réciproque qui redonne le message initial, $f^{-1}(C)=M$, soit presque impossible à calculer. Dans l'algorithme RSA, la fonction est construite à partir de deux nombres premiers p et q , sachant qu'il est facile de les multiplier pour obtenir $n=p \times q$, mais que trouver les facteurs premiers p et q à partir de la seule connaissance de n nécessite un temps de calcul rédhibitoire si les entiers sont très grands.

La cryptographie asymétrique est aujourd'hui à la base de presque tous les échanges de données sécurisés sur Internet. ■

R. C.

R. L. Rivest et al., *Comm. of the ACM*, vol. 21(2), pp. 120-126, 1978

1979 La théorie des perspectives démasque l'irrationalité humaine

Les individus prennent-ils leurs décisions de façon rationnelle ? Oui, suppose la théorie économique orthodoxe. Pas toujours, montrent les psychologues, qui ont ébauché une cartographie de l'erreur humaine toujours féconde aujourd'hui.

Dans les années 1970, deux psychologues de l'université hébraïque de Jérusalem mirent sur pied un ensemble d'expériences qui firent date. Si les énoncés proposés aux participants avaient la forme anodine de problèmes de logique ou de probabilité, les expériences servaient en réalité un projet ambitieux. Leurs auteurs, Amos Tversky et Daniel Kahneman, cherchaient à éclaircir le fonctionnement de la pensée humaine et, par là, à répondre à la question fondamentale : l'homme est-il rationnel ?

Ces chercheurs ne sont certes pas les premiers à avoir exploré le sujet. Mais ils ont incontestablement joué un rôle dans ce questionnement et, durant les décennies qui nous séparent d'aujourd'hui, ont écrit l'une des pages les plus importantes des sciences humaines et sociales. La thèse constante qu'ils défendent est que la décision, en particulier lorsqu'elle est confrontée à l'incertitude, ne peut être décrite comme objectivement rationnelle. Cette position était originale, car la

conception alors dominante en psychologie était celle d'un homme rationnel qui cherche à maximiser l'utilité espérée d'une situation, une conception chère à l'économie orthodoxe. La théorie qu'ils établirent à partir de l'article fondateur de 1979 *Prospect theory: An analysis of decision under risk* a mis sérieusement en question ces idées dominantes ; elle valut à Daniel Kahneman le prix d'économie en mémoire d'Alfred Nobel, en 2002 (Amos Tversky est mort en 1999). Elle est connue aujourd'hui sous le nom de « théorie des perspectives ».

En fondant cette théorie, Daniel Kahneman et Amos Tversky ne cherchaient pas tant à provoquer un changement de paradigme en économie qu'à pointer des anomalies dans la description habituelle que faisait du jugement humain cette discipline. Ainsi, l'économie orthodoxe offrait une conception axiomatisée de la rationalité. Pour n'en prendre qu'un exemple, l'un des axiomes de ce modèle énonce que si A est préféré à B, et B à C, alors A doit être préféré à C. Dès 1969, Amos Tversky a montré qu'il ne correspondait pas toujours aux décisions des individus ou des groupes humains. ➤

L'AUTEUR



GÉRALD BRONNER
professeur
de sociologie
  l'université
Paris-Diderot

Jeux de hasard, opérations financières, stratégie politique ou militaire, etc. : les décisions humaines sont souvent influencées par des perceptions erronées.



> Au-delà de ces critiques ciblées, c'est le modèle même de l'utilité espérée que la théorie des perspectives remet en question. Ce modèle tire ses racines historiques de la réponse que Pascal donna au chevalier de Méré lorsque ce dernier lui demanda s'il y avait une façon rationnelle de se conduire devant les jeux de hasard. Le philosophe répondit qu'en effectuant une moyenne des divers gains possibles pondérée par les probabilités correspondantes, on pouvait inférer la somme qu'il était raisonnable d'accepter de miser, ce qui définissait ainsi le calcul de l'espérance mathématique. Par exemple, le prix d'équilibre d'un billet de loterie qui vous propose de gagner 500 euros avec 1 chance sur 10 est de 50 euros.

Très vite, on s'aperçut cependant que cette solution posait un problème nommé paradoxe de Saint-Petersbourg. Énoncé notamment en 1713 par Nicolas Bernoulli, ce paradoxe montre que la logique ordinaire ne peut se résoudre à suivre les conseils du calcul mathématique. Supposons un jeu à pile ou face où l'on s'arrête lorsque le côté face est obtenu, et où le joueur gagne 2^n euros si le côté face est obtenu au n -ième jet. La question est : quel coût d'entrée doit-on accepter de payer pour participer à ce jeu, sachant que la somme mise est définitivement perdue ?

La plupart d'entre nous ne serions pas prêts à miser une somme importante, alors même que l'espérance mathématique du gain est infinie. Daniel Bernoulli (le cousin de Nicolas) proposa une réponse à ce paradoxe en 1738, en distinguant entre une somme d'argent et l'utilité de cette somme. Par utilité, on entend la valeur psychologique qu'un individu attribue à un objet ou à une ligne de conduite. Bernoulli souligna que l'utilité d'un petit accroissement de la richesse est inversement proportionnelle à la quantité des biens déjà possédés. Il identifiait ainsi, pour la première fois, ce que l'on nomme aujourd'hui en économie la décroissance de l'utilité marginale.

La théorie des perspectives a remis profondément en question la théorie de l'utilité espérée, qui avait longtemps permis de modéliser la décision humaine. Un simple exemple suffit à le faire comprendre. Si l'on propose de choisir entre deux options, gagner 900 euros ou avoir 90 % de chances de gagner 1000 euros, beaucoup choisiront la certitude de gagner plutôt que le pari. En revanche, si l'on propose de perdre 900 euros ou d'avoir 90 % de chances de perdre 1000 euros, beaucoup choisiront cette fois le pari, en parfaite contradiction avec la cohérence que suppose le modèle de l'utilité espérée.

Ainsi, la détermination de l'utilité psychologique ne dépend pas seulement de l'état de la richesse, mais aussi de la référence à partir de laquelle la décision sera prise. C'est

précisément l'un des trois points fondamentaux de la théorie des perspectives. L'exemple que Daniel Kahneman propose lui-même pour faire comprendre cette idée est celui de la perception sensorielle. La température subjective de l'eau ne sera pas évaluée de la même façon selon qu'on l'estime par rapport à un point de référence plus chaud ou plus froid. C'est pour quoi, par exemple, la différence subjective entre 900 et 1000 euros est beaucoup moins importante qu'entre 100 et 200 euros.

De la même façon, il existe une asymétrie psychologique entre les perspectives positives et négatives, ce dont ne rend pas compte la théorie de l'utilité espérée. Amos Tversky et Daniel Kahneman ont montré avec leurs expériences que, à l'évidence, les pertes ont plus d'impact

Psychologiquement et en moyenne, il faut 2,50 euros de gain pour compenser 1 euro de perte

sur nos décisions que les gains équivalents. Autrement dit, pour la plupart d'entre nous, la peur de perdre 100 euros est plus intense que l'espoir d'en gagner 130. Ils ont même pu montrer qu'il faut en moyenne 2,50 euros de gain pour compenser 1 euro de perte.

La théorie des perspectives est-elle une véritable révolution scientifique au sens de Thomas Kuhn ? Peut-être pas, car, comme l'a souligné avec beaucoup de sagesse Daniel Kahneman lui-même, le modèle de l'utilité espérée, malgré ses imperfections, rend encore de beaux services à la modélisation des phénomènes économiques.

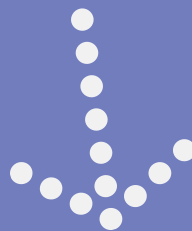
Au-delà de ce dialogue avec les sciences économiques orthodoxes, les deux psychologues ont engagé une cartographie de l'erreur humaine qui n'a pas fini de faire sentir ses influences dans l'ensemble des sciences humaines et sociales. Cette entreprise de caractérisation du jugement humain et de ses erreurs systématiques permet en effet de mettre au jour des invariants mentaux qui instruisent tout autant l'anthropologie que les sciences de l'éducation ou la sociologie contemporaine. Elle a même une influence notable sur l'originale et récente théorie du *nudge*, relative aux incitations indirectes et positives capables d'orienter notre comportement et nos décisions. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Thaler et C. Sunstein, **Nudge**, Penguin Books, 2008.

A. Tversky et D. Kahneman, **Advances in prospect theory : Cumulative representation of uncertainty**, *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 5(4), pp. 297-323, 1992.

D. Kahneman et A. Tversky, **Prospect theory : An analysis of decision under risk**, *Econometrica*, vol. 47(2), pp. 263-292, 1979.



les conférences

Au Palais de la découverte Entrée libre dans la limite des places disponibles

Cycle de 5 conférences

> **Les samedis à 15h**

■ Vers le meilleur des mondes ?

Robots enseignants, robots empathiques pour personnes âgées, commandes par la pensée... Vers quel monde mènent les machines à l'intelligence et à l'affection artificielles ?

18 novembre

Aux sources du numérique

Avec Emmanuel Lazard, maître de conférences en informatique à l'université Paris-Dauphine ; Pierre Mounier-Kuhn, historien, chercheur au CNRS et à l'université de Paris-Sorbonne.

25 novembre

Quand les robots sèment le trouble

Avec Laurence Devillers, professeure à l'université Paris-Sorbonne IV et chercheuse au Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur (Limsi) du CNRS, membre de la Cerna d'Allistène.

2 décembre

Le numérique au secours du cerveau humain

Avec Olivier Colliot, chercheur au CNRS, responsable de l'équipe Aramis (équipe de recherche commune à l'Inria, l'université Pierre-et-Marie-Curie, l'Inserm et le CNRS), de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM).

9 décembre

Écrire à la vitesse de la pensée ?

Avec Fabrizio De Vico Fallani, chercheur de l'équipe Aramis, ICM.

16 décembre

La preuve par les faits à l'ère du Big Data

Avec Claudine Schwartz, professeur des universités en mathématiques, à l'université Joseph-Fourier de Grenoble.



© Garrett Ziegler-Flickr

En partenariat avec



Avec le soutien de



La machine d'Anticythère, premier calculateur analogique connu, trouvée en 1901 dans l'épave d'une galère romaine.