

Le nouvel âge de l'identification par l'ADN

Tests d'ancestralité, bases génétiques en ligne, enquêtes judiciaires... Les informations liées à l'ADN n'ont jamais été aussi partagées. Une démocratisation liée à des avancées scientifiques qui n'est pas sans risques pour la protection de l'anonymat des données



EMMANUEL PIERROT/AGENCE VU

CATHERINE MARY

Ils avaient semé la psychose, et le souvenir de leurs crimes s'est ancré dans les esprits. En Californie, le « Golden State Killer », avait commis une douzaine de meurtres et une cinquantaine de viols dans les années 1970 et 1980. En France, en 2014, « le violeur du 8^e » agressait la nuit à l'arme blanche des femmes dans cet arrondissement de Lyon. En Arizona dans les années 1990, « The Canal killer » avait tué deux jeunes femmes dont les têtes avaient été retrouvées dans un canal à Phoenix.

L'effroi n'est pas la seule raison pour laquelle ces crimes ont défrayé la chronique. Pour les résoudre, les enquêteurs ont poussé aux limites les possibilités d'exploitation de l'ADN retrouvé sur les scènes des crimes, relançant ainsi des affaires restées parfois bloquées durant des années.

Les avancées scientifiques et technologiques permettent un décryptage toujours plus approfondi de

la composition des génomes, tandis que la démocratisation des tests génétiques se traduit par un partage inédit des informations liées à l'ADN, notamment par les banques de données généalogiques. Les enquêteurs, soucieux de décrypter les vérités enfouies dans l'ADN, sont tentés par ces possibilités. Ils inaugurent de nouveaux usages qui, tout en satisfaisant l'enquête, ouvrent aussi des brèches dans des cadres juridiques pensés lors de la création des fichiers d'empreintes génétiques en 1989 aux Etats-Unis et au début des années 2000 dans les pays européens. Certains révèlent aussi des failles béantes en matière de protection de l'anonymat des données génétiques, comme viennent de le démontrer deux études parues début octobre dans les revues *Science* et *Cell*.

Ces deux études ont été inspirées par l'enquête qui a conduit à l'arrestation en avril 2018 de Joseph DeAngelo, le « Golden State Killer » présumé. Depuis des années, le fichier national d'empreintes génétiques restait muet face à l'ADN prélevé sur les

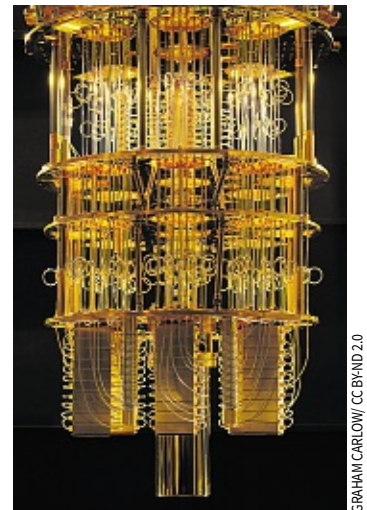
scènes de crime. Les enquêteurs se sont donc tournés vers la base de données généalogiques GEDmatch, contenant les données génétiques produites par des tests d'ancestralité. En avril 2018, plus de 17 millions de personnes avaient eu recours à ces tests proposés par des sociétés comme 23andme, Ancestry.com ou Myheritage et informant sur les origines géographiques ou la prédisposition à certaines maladies. Les résultats reposent sur l'analyse des variations ponctuelles du génome qui distinguent les individus. Si nous partageons en effet 99,9 % de notre génome avec nos semblables, il s'en distingue par 0,1 %, soit un nucléotide sur 1 000. Au total, les génomes de deux individus choisis au hasard diffèrent d'environ dix millions de variations ponctuelles. Certaines signalent une origine géographique ou informent sur une prédisposition plus ou moins grande à certaines maladies. Les tests d'ancestralité consistent en une analyse de 700 000 de ces variations.

➔ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

L'Europe mise sur le quantique

L'Union européenne va financer un vaste programme visant à faire sortir des laboratoires des technologies qui font appel à des comportements étranges des atomes et de la lumière

PAGE 3



GRAHAM CARLOW/CC BY-ND 2.0

Mieux évaluer les traitements pédiatriques

De nombreux médicaments sont encore prescrits aux enfants sans évaluation ou autorisation spécifiques à leur âge. Des réseaux nationaux ou européens veulent pallier cette carence

PAGE 2

Portrait Le psychologue des voitures autonomes

Jean-François Bonnefon conquiert le monde avec son étude des dilemmes moraux posés aux véhicules sans chauffeur

PAGE 8



Les réseaux, une force pour la recherche clinique en pédiatrie

MÉDECINE - Deux structures, l'une européenne et l'autre française, ont été créées cette année pour accélérer la recherche sur le traitement spécifique des enfants, encore peu étudié. Notamment en développant les essais de médicaments innovants

Favoriser le développement de nouveaux médicaments pour les enfants. Telle est l'ambition du réseau européen de recherche clinique en pédiatrie Conect4Children (C4C), qui rassemble 33 partenaires académiques et 10 industries pharmaceutiques de 20 pays. Pour la première fois depuis son lancement en mai 2018, il s'est réuni début septembre à Paris. « *Se structurer à l'échelle nationale et européenne est indispensable pour développer des médicaments sûrs et efficaces adaptés aux enfants* », affirme le professeur de pédiatrie Régis Hankard (CHU de Tours, université de Tours), organisateur pour l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) de cette réunion sur l'émergence des réseaux nationaux et l'harmonisation des pratiques entre pays. Régis Hankard coordonne également la contribution française à C4C, le réseau de recherche clinique en pédiatrie Pedstart. Lancé en janvier 2018, il regroupe sept centres d'investigation clinique (CIC) de l'Inserm – d'autres le rejoindront bientôt – et intègre deux réseaux préexistants : le Réseau d'investigations pédiatriques des produits de santé (Ripps) et Hugoperen dans le Grand Ouest. « *Nous avons dépassé les rivalités locales pour parler d'une voix unique au niveau européen* », apprécie le professeur.

Si de nouvelles forces collectives se déploient aujourd'hui, c'est que les enfants restent les parents pauvres de la recherche clinique. Le constat ne date pas d'hier : dans les années 2000, des études montraient déjà que 50 % des médicaments étaient délivrés aux enfants sans évaluation ou autorisation spécifiques à leur âge. Ce qui pose problème, car les enfants ne sont pas des adultes miniatures. Par exemple, « *le type d'enzymes et leur quantité dans l'organisme évoluent avec l'âge. Or ces protéines servent à rendre un médicament actif, puis à l'éliminer* », illustre Corinne Alberti, directrice du Centre d'investigation clinique et d'épidémiologie clinique à l'hôpital Robert-Debré, à Paris. D'où la nécessité de recherches spécifiques.

Développer les essais cliniques

Certaines spécialités, telle l'oncologie, sont organisées de longue date : « *Depuis plus de vingt ans, les oncologues pédiatres se sont structurés en réseau, convaincus que seule la recherche destinée aux enfants peut améliorer les taux de guérison* », souligne le professeur Gilles Vassal, directeur de la recherche clinique à Gustave-Roussy et président du consortium européen ITCC (Innovative Therapies for Children with Cancer), né en 2003 pour fédérer les centres d'oncologie pédiatrique. Au sein de son comité de pilotage, Pedstart bénéficiera de l'expertise du professeur Vassal. Le réseau français, plurithématique, compte accompagner des projets complexes dans toutes les disciplines, en partenariat avec les réseaux de spécialité déjà existants pour accélérer, entre autres, la recherche sur les maladies rares.

D'autres spécialités devraient suivre, car depuis 2007, le règlement pédiatrique européen a changé la donne : toute demande d'autorisation de mise sur le marché d'un médicament pour

l'adulte s'accompagne, sauf dérogation, d'un développement chez l'enfant. Quel bilan dix ans après ? « *Le règlement est efficace dans les domaines où les besoins de l'enfant coïncident avec ceux de l'adulte*, rapporte Sylvie Benchetrit, référente pédiatrique à l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) et déléguée au comité pédiatrique pour la France à l'Agence européenne des médicaments (EMA). *En revanche, le développement de médicaments destinés uniquement à l'enfant reste à la traîne.* »

En oncologie et en néonatalogie, le règlement n'a pas atteint ses objectifs. « *Lorsque ma fille Margaux est décédée d'une tumeur au cerveau en 2010, elle n'avait pu bénéficier d'aucun essai clinique* », regrette Patricia Blanc, présidente d'Imagine for Margo, qui finance des programmes de recherche contre le cancer des enfants. Aujourd'hui, les essais de médicaments innovants se développent en oncologie pédiatrique, mais seuls 10 % des enfants en échec thérapeutique y ont accès en Europe. En cause, la complexité des essais et l'étroitesse du marché, entraînant un moindre retour sur investissement pour les industriels.

« *Les réseaux pédiatriques peuvent compléter l'action réglementaire* », estime Sylvie Benche-

trit. Pour Claire Lévy-Marchal, membre du bureau exécutif de F-CRIN (plate-forme nationale d'infrastructures de recherche clinique), les réseaux représentent « *une force de frappe considérable* » pour développer les essais pédiatriques. D'abord, ils améliorent le recrutement, plus difficile chez l'enfant : en raison d'une moindre prévalence des maladies, la mobilisation de plusieurs centres d'investigation dans différents pays est nécessaire. Nombre d'études s'arrêtent en cours de route faute de participants. En France, Pedstart constitue un guichet unique d'accès à plusieurs sites investigateurs. Même ambition de C4C au plan européen.

Impliquer les enfants

Autre difficulté liée à ces faibles effectifs, la méthodologie classique des essais cliniques n'est pas adaptée. D'autant que les enfants ne forment pas un groupe homogène : la recherche doit considérer les différents âges, des prématurés aux adolescents. Elle développe de nouvelles méthodes, comme celles dites « adaptatives », qui évoluent au cours de l'essai. Un enjeu-clé pour la recherche clinique pédiatrique. Par ailleurs, « *il faut assurer un suivi des effets indésirables à long terme. Une*

toxicité peut se manifester plus tard dans le développement de l'enfant », pointe Corinne Alberti. Face à ces défis, les deux réseaux comptent partager expertises et exigences de qualité.

« *La qualité, c'est aussi l'attention portée à la voix de l'enfant et sa famille* », estime le professeur Régis Hankard. Dans sa réponse au premier appel d'offres de C4C, Pedstart prévoit d'associer les 14 jeunes experts (11 à 18 ans) de Kids France, un groupe lancé en 2015 par le Ripps. Ils sont formés et donnent leur avis sur la recherche pédiatrique, de la priorisation à la communication. Par exemple, ils ont travaillé sur un document donné aux patients dans le cadre d'un essai sur la sclérose tubéreuse de Bourneville, ou réalisé une vidéo pour les jeunes atteints de cystinose (deux maladies rares). « *Ils apportent une vision différente de celles des chercheurs ou des laboratoires* », souligne Ségolène Gaillard, coordinatrice de Kids France et chef de projet clinique au CIC de Lyon (Inserm, Hospices civils de Lyon, université Lyon-I). Au niveau européen, une association membre de C4C rassemble les groupes d'enfants experts. L'objectif ? Développer une recherche pédiatrique en adéquation avec les besoins des patients. ■

NATHALIE PICARD



Aux urgences pédiatriques d'un hôpital d'Ille-et-Vilaine. JÉRÔME FOUQUET/PHOTOPQR/OUEST FRANCE/MAXPPP

L'expédition Tara Pacific rentre à bon port avec ses trésors

BIODIVERSITÉ - Après deux ans à scruter les coraux du Pacifique, la goélette est arrivée à Lorient avec des années de résultats à étudier

Dans le monde de la recherche scientifique, Tara n'est plus à présenter. Bateau polaire à l'origine, la goélette incarne aujourd'hui la Fondation Tara, première fondation reconnue d'utilité publique sur les océans. Depuis 2003, la goélette grise est devenue un emblème et un navire unique. Après Tara Arctic, Tara Oceans, Tara Méditerranée, voilà l'expédition Tara Pacific qui s'achève. Le bateau est arrivé samedi 27 octobre à Lorient, son port d'attache, avec à son bord un état des lieux très poussé des récifs coralliens du Pacifique. « *En quinze ans, nous avons mené des recherches scientifiques de très haut vol avec de nombreux laboratoires de recherche afin de mieux comprendre les enjeux environnementaux sur la planète mer* », précise Etienne Bourgois, directeur général de la marque de vêtements Agnès b., armateur du bateau.

Le Pacifique abrite près de 40 % des coraux de la planète. Pour Serge Planes, coordinateur scientifique de l'expédition et directeur de recherche CNRS au Centre de recherche insulaire et observatoire de l'environnement en Polynésie, cette mission est un réel succès puisque les équipes de bord ont réalisé près de 90 % de l'objectif initial. « *C'est la première expédition de cette envergure, dit-il. Près de 36 000 échantillons ont été récoltés et tous les archipels ont été au moins visités une fois.* »

Même satisfaction du côté de Tara Expéditions. « *Nous avons réalisé près de 2 700 plongées. Le tout sans problèmes techniques majeurs* », précise Romain Troublé, le président de la Fondation Tara.

Serge Planes a concentré les prélèvements sur trois espèces de coraux sur les 1 500 répertoriées. « *Nous nous sommes penchés sur des espèces que l'on retrouvait par-*

tout dans le Pacifique : un corail massif, un corail branchu et un corail de feu [très urticant lorsqu'on le touche] qui sont très importants dans la construction des récifs. » Il explique que chaque récif a son propre seuil de stress. Si la température de l'eau s'élève de 1 à 2 degrés Celsius pendant quelques jours, le polype se sépare des micro-algues qui le nourrissent et lui donnent ces couleurs. Alors, l'animal devient pâle, blanchit et le corail s'épuise avant de mourir si le phénomène persiste.

Dégradation côtière

Si certaines espèces sont plus ou moins résistantes en fonction de leur physiologie et de leur particularité génétique, d'autres peuvent s'adapter à ces modifications d'environnement. « *Tout dépend de la température moyenne dans laquelle ils se trouvent de façon permanente.* » Les coraux

situés dans les latitudes basses ou hautes (plus tempérées) blanchissent à des températures plus basses. Ceux qui se trouvent plutôt en zone tropicale, donc à des températures plus élevées, blanchiront à des températures plus hautes. « *Ce qui est beaucoup plus chaotique, c'est la façon dont se met en place géographiquement le blanchissement*, explique Serge Planes. *C'est une combinaison de facteurs associés au réchauffement de la planète, notamment liés à un contexte de "warm blooms", des bulles d'eau chaude situées dans des zones particulièrement restreintes, marquées par un réchauffement très localisé.* »

A proximité des grosses métropoles, notamment en Asie du Sud-Est, l'état de santé des coraux et sa variabilité dépendent principalement des pressions liées aux activités humaines directes, qui s'ajoutent au réchauffement

climatique. Il ne s'agit plus de blanchissement mais de dégradation côtière, causée notamment par la pollution, l'absence de traitement des eaux usées, la surpêche et la déforestation, qui facilite le déversement des sédiments dans les rivières et leur dépôt sur le corail jusqu'à son étouffement. « *Il s'agit d'une agression physique et, comme le récif est côtier, il la subit de plein fouet* », continue le spécialiste des coraux.

En attendant que cette quantité énorme de prélèvements puisse livrer son secret, les scientifiques ont déjà fixé une tendance pour l'avenir des récifs du grand océan. Les épisodes de blanchissement pourraient devenir un phénomène annuel pour 90 % des récifs coralliens au cours des prochaines décennies. Et si les prévisions sur leur évolution ne prévoient plus leur disparition complète, les dégradations devraient se

poursuivre jusqu'à ce que le changement climatique se stabilise et que de nouveaux types d'assemblages de récifs puissent résister aux nouvelles conditions thermiques. Le consortium Tara Pacific (qui représente vingt-trois laboratoires et une centaine de chercheurs) aura besoin de deux à cinq ans avant d'obtenir une vision globale de ces phénomènes.

Mais la Fondation Tara appelle d'ores et déjà les Etats à prendre immédiatement six mesures d'urgence afin d'atténuer le stress subi par les récifs : amélioration de la gestion des déchets plastiques, limitation de l'impact de l'agriculture, de l'élevage et de la déforestation, interdiction ou contrôle des méthodes de pêche, du développement des grandes infrastructures côtières et enfin sensibilisation des populations locales à préserver leur propre environnement. ■

DINO DI MEO

TÉLESCOPE

Technologies quantiques : l'Europe accélère

PHYSIQUE - La première phase du programme européen Quantum Technology a été lancée. L'enjeu : appliquer les recherches de la seconde révolution quantique à l'industrie

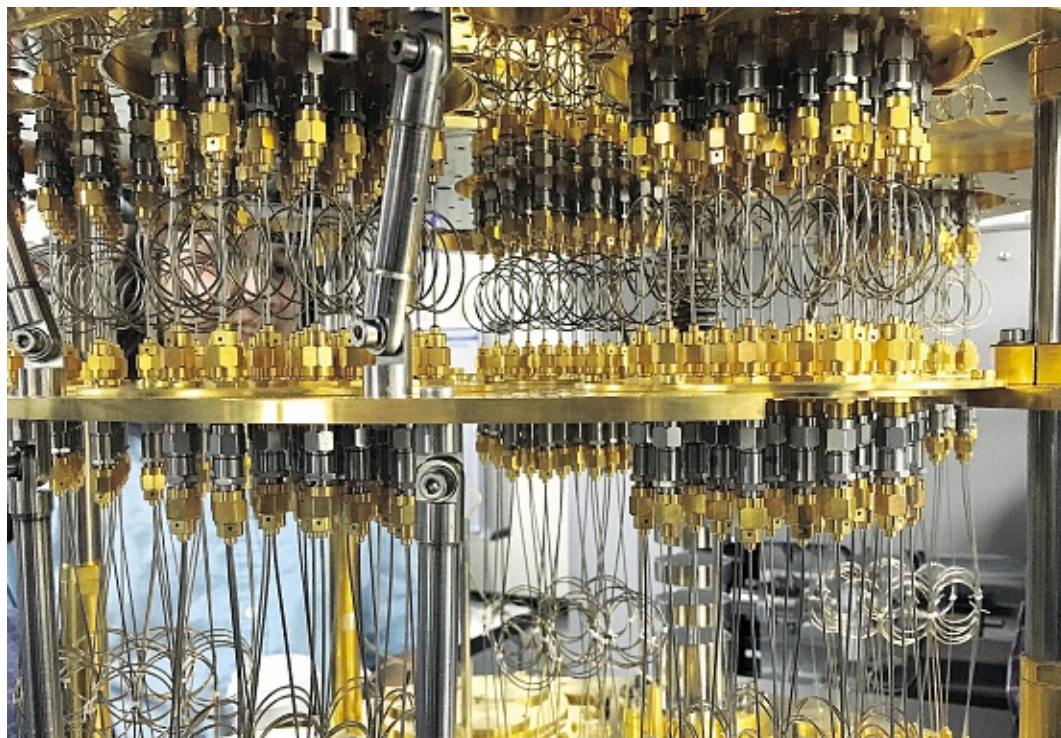
C'est parti. L'Europe affirme ses ambitions dans un domaine aux frontières de la physique fondamentale et de la recherche appliquée : les technologies quantiques. A Vienne, depuis lundi 29 octobre, le coup d'envoi de la première phase du programme européen Quantum Technology (QT) a été donné avec l'annonce des 20 premiers projets financés sur trois ans à hauteur de 132 millions d'euros (et jusqu'à 10 millions d'euros par projet). Au bout de dix ans, les financements conjoints de l'Union européenne et des Etats membres devraient atteindre le milliard d'euros. C'est le troisième projet, étiqueté Flagship (« fleuron »), lancé par l'Union européenne avec une telle ampleur sur une thématique précise. Les deux premiers, sur le graphène et les neurosciences, ont débuté en 2013.

Pour QT, le chantier a débuté en 2016 avec la parution d'un manifeste (« Quantum Manifesto ») signé par plus de 3000 acteurs du domaine, dont 156 entreprises européennes et 20 institutions de recherche. Le but de ce nouveau Flagship est de « consolider et étendre les forces scientifiques européennes dans ce domaine de recherche et [de] démarrer une industrie compétitive dans ce secteur ».

Propriétés de la matière

Plus concrètement, il s'agit d'accélérer le passage depuis les laboratoires vers différents marchés de ce qu'il est convenu d'appeler la seconde révolution quantique. La première a depuis longtemps effectué cette transition. Les transistors électroniques et les processeurs, le laser ou la géolocalisation par satellite (qui fonctionne avec des horloges atomiques) en sont des exemples. Ces applications reposent, pour l'essentiel, sur les propriétés quantiques de la matière aux échelles microscopiques : les échanges d'énergie ne sont pas continus, comme en physique classique, mais discrets (ou quantifiés).

La seconde révolution repose sur des propriétés autrement plus « bizarres », comme le fait qu'un système puisse être dans deux états à la fois (superposition), ou qu'une modification physique sur l'un des membres d'une paire



Le réfrigérateur à dilution d'IBM, nécessaire au fonctionnement de son ordinateur quantique. IBM RESEARCH/CC BY-ND 2.0

d'objets se répercute instantanément sur l'autre membre (intrication). Cette dernière a été prouvée expérimentalement en France au début des années 1980. « Mais à l'époque, on avertissait les physiciens qu'ils allaient ruiner leur carrière à pousser dans cette voie », rappelle Tommaso Calarco, professeur à l'université de Cologne (Allemagne), coauteur du manifeste et coordinateur du Flagship.

Les temps ont changé, car plusieurs groupes de recherche ont montré qu'il était possible de « jouer » avec ces comportements étranges des atomes et des photons (les grains de lumière) pour imaginer et tester de nouveaux systèmes : des communications plus sûres, des machines capables d'effectuer des calculs infaisables, des horloges atomiques plus précises... Cela marche, mais reste pour l'instant souvent confiné aux laboratoires. « Lorsque nous avons observé l'intérêt des grands groupes comme Google, Intel, Microsoft, IBM pour ces technologies, nous avons su que c'était le bon moment pour lancer ce projet de grande envergure », indique Tommaso Calarco. C'est pour cela que chacun des 20 projets inclut au moins un

industriel (l'un est même piloté par l'un d'eux, Thales, en France). A l'issue des trois premières années, des démonstrateurs sont attendus. La France coordonne directement deux projets.

L'avance chinoise

Un autre événement a aussi conduit l'Europe à accélérer. En lançant en 2016 le satellite Micius, les Chinois ont été les premiers à réaliser des échanges sécurisés grâce à des protocoles quantiques entre la Terre et le Ciel, voire entre deux points de la Terre, via Micius. Leur investissement dépasse celui de l'Europe et a également poussé l'administration Trump, aux Etats-Unis, à lancer en juillet un programme de l'ordre du milliard d'euros également.

Plus concrètement, le Flagship européen se découpe en quatre secteurs principaux : calcul, communication, simulation et métrologie. Le premier, avec son avatar mythique, l'ordinateur quantique, sera sans doute le plus ambitieux à réaliser. C'est sur lui que les gros acteurs de l'informatique parient et se concurrencent. Pour l'instant, aucune machine n'a démontré sa supériorité sur

les ordinateurs classiques. Les trois autres piliers sont plus avancés. Le pilier communication vise à utiliser intrication et superposition pour garantir la sécurité, non pas grâce aux mathématiques comme aujourd'hui, mais grâce à des propriétés physiques intrinsèques de la matière. La start-up Id Quantique en Suisse vend déjà de tels systèmes, mais d'autres pistes seront explorées dans le Flagship. Surtout, il faut augmenter les distances pour lesquelles cela fonctionne en inventant des « répéteurs quantiques ». Lesquels pourraient aussi servir à constituer un « Web quantique » plus sûr.

Le volet simulation consiste à réaliser, à base d'atomes individuels ou de photons, des systèmes modèles susceptibles de reproduire des situations plus complexes, comme un matériau supraconducteur. Enfin, en métrologie, plusieurs groupes cherchent à améliorer la précision des mesures de temps, de champs magnétiques, de vibration, de gravitation... en bénéficiant de l'extrême sensibilité des atomes ou des photons aux échelles quantiques. ■

DAVID LAROUSSE

MÉDECINE

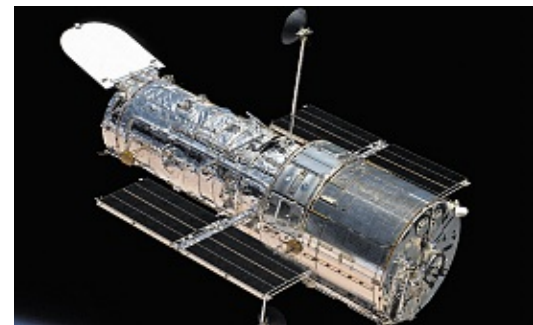
Des chiens pour détecter le paludisme

Une équipe de l'université de Durham et de l'école de médecine tropicale de Londres, au Royaume-Uni, est parvenue à entraîner des chiens afin de détecter la présence du paludisme. Un golden retriever et un labrador se sont ainsi vu présenter des chaussettes en Nylon portées par des enfants gambiens. Trente provenaient d'enfants porteurs du parasite *Plasmodium falciparum* – agent responsable de la maladie –, et 145 d'enfants sains. Lexi et Sally sont parvenus à déceler 70 % des échantillons positifs et 90 % des échantillons négatifs. Les travaux, encore en phase préliminaire, ont été présentés, lundi 29 octobre, au congrès de la société américaine de médecine tropicale, à La Nouvelle-Orléans. Pour leurs auteurs, « cela devrait permettre de disposer de moyens non invasifs de détecter la maladie aux ports d'entrée et de freiner sa dissémination ».

ASTRONOMIE

Hubble et Chandra opérationnels

Après trois semaines d'interruption, le télescope spatial Hubble a pu reprendre ses observations, samedi 27 octobre, a annoncé la NASA. Le 5 octobre, la panne d'un gyroscope, un dispositif destiné à orienter et à stabiliser le télescope, avait conduit celui-ci à se mettre en mode de sécurité. Les ingénieurs de la NASA ont mobilisé un gyroscope de secours dès le lendemain, mais celui-ci donnait des informations incohérentes sur sa vitesse de rotation, ce qui a nécessité des manœuvres pour le recalibrer. « Hubble est de nouveau en mode normal d'observation scientifique, avec trois gyroscopes opérationnels », se réjouit la NASA. Le télescope, conçu pour durer quinze ans, fonctionne depuis vingt-huit ans.



L'agence spatiale avait annoncé, le 24 octobre, que Chandra, un télescope spatial observant le ciel dans la frange des rayons X, avait lui aussi repris du service après la résolution d'une panne de gyroscope. (PHOTO: NASA)

TABAGISME

L'impact s'alourdit chez les femmes

L'augmentation de la prévalence du tabagisme chez les femmes depuis les années 1970 a des répercussions majeures sur la morbi-mortalité des pathologies liées au tabac en France, selon une étude publiée dans le *Bulletin épidémiologique hebdomadaire* du 30 octobre consacré au tabagisme. Ainsi, l'incidence du cancer du poumon a augmenté de 72 % chez les femmes entre 2002 et 2012, alors qu'elle est restée stable chez les hommes. Pour les exacerbations de bronchite chronique, l'incidence des hospitalisations a crû de 50 % chez les femmes entre 2002 et 2015 (30 % chez les hommes). Les infarctus du myocarde ont augmenté de 50 % entre 2002 et 2015 pour les femmes (+ 16 % pour les hommes). Le nombre de décès attribuables au tabagisme a ainsi été multiplié par deux chez les femmes, entre 2000 et 2014 : 8 027 décès pour 2014, soit 3,1 % de tous les décès.

Kourou se prépare à accueillir Ariane-6

AÉROSPATIAL - Le centre spatial met les bouchées doubles pour construire le pas de tir de la fusée

KOOROU (GUYANE)

Le chantier, gigantesque, ne s'arrête plus. Sur le Centre spatial guyanais de Kourou, jour et nuit, dans la touffeur équatoriale, les engins s'activent sous les commandes de quelque sept cents hommes – dont soixante-dix jeunes en contrat d'insertion. Il faut profiter au maximum de la saison sèche pour avancer sur ce qui sera, sur ce qui devient, le pas de tir de la prochaine génération de lanceurs lourds européens, la fusée Ariane-6. « Toutes les infrastructures et les bâtiments devront être terminés en mars 2019 », annonce Frédéric Munos, dont le titre officiel est « responsable de la sous-direction sol à la direction des lanceurs au Centre national d'études spatiales [CNES] ». Pour le dire plus simplement, Frédéric Munos dirige ce chantier à

600 millions d'euros pour le compte du CNES, qui en est le maître d'œuvre.

Tout est colossal ici, et pas seulement le prix. Colossale la fosse qui a été creusée pour la zone de lancement : plus de 180 000 mètres cubes de terre et de roche ont été sortis afin de préparer les fondations, à commencer par les impressionnants carneaux, deux tunnels de béton de 100 mètres de long par lesquels les gaz de la future fusée s'évacueront au moment de l'allumage des moteurs.

Portique mobile

Impressionnant le château d'eau de 90 mètres de haut, dont le rôle consistera, dès qu'Ariane 6 s'élèvera de quelques mètres, à inonder le pas de tir sous 1 200 tonnes d'eau grâce à une trentaine de buses débitant chacune 1 500 litres par seconde. L'objectif : annihiler les réverbérations acousti-

ques qui, renvoyées par la dalle, pourraient faire dangereusement tanguer le lanceur au cours de ses premières secondes d'ascension.

Colossal enfin le portique mobile dans lequel s'effectuera la préparation finale de la fusée. Ce qui n'est pour l'heure qu'un incroyable enchevêtrement de poutrelles deviendra un grand cocon de 100 mètres de haut et de 7 000 tonnes, soit autant que la charpente métallique de la tour Eiffel. Contrairement à Ariane-5, construite verticalement et transportée sur des rails jusqu'à son pas de tir, le corps central d'Ariane-6 sera assemblé couché dans un bâtiment flamboyant neuf aux dimensions d'un terrain de football.

Le lanceur sera ensuite transporté par la route jusqu'à ce portique mobile où il sera mis debout et où l'on montera son dernier étage, celui qui contient

les satellites à lancer. La fusée sera aussi légèrement soulevée pour être posée sur ses boosters à poudre latéraux – deux dans la version Ariane-62, quatre dans la version Ariane-64. « Une fois qu'Ariane-6 sera prête, le portique mobile se retirera de 100 mètres six heures avant le lancement », précise Frédéric Munos.

Ces changements dans la construction de la fusée européenne s'expliquent par la volonté de réduire le temps de chaque campagne de lancement et d'économiser plusieurs dizaines de millions d'euros par tir. Ce pour conserver à Arianespace sa place de leader mondial, face notamment à la société américaine SpaceX d'Elon Musk, qui casse les coûts avec ses lanceurs réutilisables. A ce jour, assure Frédéric Munos, « le premier vol d'Ariane-6 est programmé pour le 16 juillet 2020 ». ■

PIERRE BARTHÉLÉMY

5 450

C'est le nombre d'années qui nous séparent du plus ancien usage connu du chocolat par un humain. Une équipe internationale, qui inclut plusieurs chercheurs français, vient de découvrir, sur des céramiques précolombiennes, des traces de *Theobroma cacao*. Ces objets ont été mis au jour à Santa Ana-La Florida, en Equateur, le plus ancien site de la culture Mayo-Chinchi. Cette découverte repousse de 1 500 ans l'âge de la domestication du cacao et en change la région d'origine. Jusqu'ici, les plus anciens vestiges de son usage – comme monnaie et comme breuvage – remontaient à il y a 3 900 ans et se situaient en Amérique centrale. Les auteurs pensent que les échanges marchands le long de la côte Pacifique auraient permis aux plants sud-américains de remonter vers le nord. > Blake et al, « Nature Ecology & Evolution », 29 octobre



Profilage ADN Une efficacité redoutable

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

Outre une interprétation de cette analyse, le client reçoit également un fichier de résultats bruts qu'il peut télécharger. Il peut alors poursuivre leur exploitation à l'aide de banques de données généalogiques telles que GEDmatch, comptant environ un million de profils génétiques. Ces banques mettent à la disposition de leurs usagers des logiciels de comparaison entre les profils génétiques, reposant sur l'analyse des segments du génome indiquant un degré de parenté et révélant l'existence d'un ancêtre commun.

« Accessibles à tous »

Pour certains, c'est la promesse de retrouver des parents éloignés ; pour les enfants adoptés, l'espoir d'identifier leurs parents et leurs frères et sœurs biologiques ; pour les enquêteurs, la perspective de dénicher les auteurs de crimes impu-

nis. Pour retrouver Joseph DeAngelo, ils ont ainsi identifié un cousin du troisième degré à partir duquel ils ont pu établir l'arbre généalogique au sein duquel, grâce à des indices complémentaires, ils ont repéré le meurtrier présumé.

Les auteurs de l'article publié dans *Science*, issus de la société Myheritage, de l'Université de Columbia et de l'Université de Jérusalem, ont évalué le risque pour une personne anonyme d'être ainsi identifiée, à partir d'un ensemble de 1,2 million de données génétiques détenues par Myheritage. La probabilité de trouver, dans la base de données GEDMatch, un profil ADN apparenté à un cousin du troisième degré ou plus proche est de 60 %. Elle est encore de 15 % pour un cousin du deuxième degré ou plus proche. Ils ont ensuite montré qu'une fois qu'un cousin est retrouvé, des données démographiques élémentaires telles que le lieu approximatif de résidence et la date de naissance peuvent être utilisées pour identifier l'individu recherché, grâce à la reconstruction de l'arbre généalogique.

« C'EST UNE QUESTION D'ÉQUILIBRE ENTRE LA LUTTE CONTRE LA CRIMINALITÉ ET LA PROTECTION DE LA VIE PRIVÉE »

ORIOLA SALLAVACI,
ANGLIA RUSKIN UNIVERSITY

Encore plus surprenant, leur étude révèle également qu'en une journée de recherche, il est possible de lever l'anonymat d'un profil génétique contenu dans une base de données publique de recherche telle que 1000 Genomes Project. Ils ont pour cela repéré dans la base GEDmatch deux individus cousins au 6^e ou 7^e degré de la personne recherchée et également apparentés entre eux, d'où l'existence d'un ancêtre commun aux trois. Ayant remonté à cet ancêtre commun, dont ils

ont étudié la descendance, il leur a suffi ensuite de sélectionner la personne recherchée en s'appuyant sur des informations démographiques élémentaires, tels l'âge et le sexe. Selon leurs estimations, une base de données génétique ne couvrant que 2 % de la population adulte permet d'établir une correspondance avec un cousin du troisième degré ou plus proche pour presque n'importe quelle personne recherchée.

« Bien que les décideurs politiques et le public soient probablement favorables au renforcement des capacités médico-légales pour résoudre les crimes, cela repose sur des bases de données et des services qui sont accessibles à tous », commentent les auteurs de l'étude. « La même technique peut être utilisée à des fins nuisibles telles que la ré-identification de sujets de recherche à partir de leurs données génétiques », complètent-ils. « Avec ces banques, il y a plus de personnes fichées mais également plus de données pour chaque personne, et le recours à ces banques va

« LA PREUVE GÉNÉTIQUE BOUSCULE LE SYSTÈME JUDICIAIRE »

Pascal Beauvais est professeur de droit et de sciences criminelles à l'université Paris-Ouest-Nanterre, où il codirige le Centre de droit pénal et de criminologie. Il est à la fois formé au droit et aux sciences sociales, et a été responsable scientifique d'un des volets du projet « Fichier et témoins génétiques », financé par l'Agence nationale de la recherche et dont le colloque de clôture s'est tenu les 11 et 12 octobre à l'Ecole des hautes études en sciences sociales. C'est dans ce cadre qu'il est intervenu pour décrypter le discours de la preuve par l'ADN.

L'ADN est souvent considéré, dans le contexte judiciaire, comme la « reine des preuves ». D'où cette expression vient-elle ?

Dans le droit pénal français, la preuve génétique bouleverse le régime de vérification judiciaire, qui repose sur la discussion des preu-

ves et admet une part d'approximation et de conviction. La vérité judiciaire n'est donc pas absolue. Or, avec l'ADN, la vérification judiciaire s'appuie sur une deuxième forme de vérité, la science, et c'est l'usage combiné de ces deux méthodes qui donne toute sa force à la preuve génétique. C'est pour cette raison que l'ADN est souvent considéré en droit français comme la « reine des preuves » : établie avec l'objectivité, la rigueur et la rationalité de la science, sa fiabilité s'imposerait au juge. A certaines conditions techniques, la preuve génétique permet en effet d'établir avec une certitude frôlant les 100 % que l'ADN prélevé ou recueilli sur une scène d'infraction correspond à celui d'une personne qui fait partie d'un fichier de données génétiques.

Avec quelles conséquences ?

Cette preuve génétique a donné lieu à un discours idéalisé fondé

sur l'objectivité de la science, qui ne laisserait plus de place au doute et au débat contradictoire. Avec ce discours, on sort du régime de preuve relative et contestable, évalué par la justice, admettant une dose de reconstruction et de discussion pour revenir à une preuve plus automatique et impérieuse s'imposant au juge. Ce discours doit néanmoins être réévalué, car la preuve par l'empreinte génétique n'obéit que partiellement à un pur régime scientifique. Si la comparaison de l'ADN d'une trace inconnue avec les empreintes contenues dans un fichier est en effet une opération intellectuelle largement objective – et cela, même si elle recèle une part d'interprétation –, tout le reste de l'établissement de la vérité, et cela est vaste, demeure profondément déterminé par des dispositifs sociaux professionnels et institutionnels influents, qui varient beaucoup d'un pays à l'autre.

Quels sont ces dispositifs ?

D'abord, la capacité à identifier la personne dépend de la constitution et de la gestion d'un vaste fichier d'empreintes génétiques, dont la qualité dépend de nombreux paramètres juridiques et techniques (dispositifs d'alimentation, de conservation, de transfert de données...). Les caractéristiques de ce fichier déterminent la capacité de vérification de ce mode de preuve. Or, même s'il est sous le contrôle d'un magistrat du parquet, il est géré par une administration policière, ce qui lui confère une dimension secrète et peu accessible. Plus largement, la preuve ADN devrait systématiquement s'inscrire dans un processus probatoire plus global, ouvert et contradictoire, dont elle ne serait qu'un élément parmi d'autres, ce qui n'est pas toujours le cas.

En quoi cela modifie-t-il la nature de la preuve par ADN ?

En raison de ce contexte d'élaboration, la preuve ADN n'a donc pas qu'une nature scientifique. Elle a aussi une nature bureaucratique, qui produit des formes de défiance ou, à tout le moins, des questionnements chez les acteurs de la justice. Même s'ils se forment, ceux-ci ont du mal à appréhender, discuter et contester cette preuve sur laquelle ils ont peu de prise et dont ils ne maîtrisent parfois pas le langage. Les experts en viennent à prendre une place décisive dans le processus d'établissement de la vérité judiciaire. La croyance dans la force probatoire de l'ADN bouleverse, de manière souterraine mais indéniable, les équilibres classiques du procès.

Que pensez-vous de l'évolution du contexte de l'usage des données génétiques par la justice ?

Les cadres juridiques qui ont été mis en place pour la création et l'exploitation des fichiers d'em-

preintes génétiques s'inscrivaient à l'époque dans une logique simple de recoupement d'une trace et d'une empreinte. Les potentialités d'exploitation des données génétiques se multiplient de manière exponentielle : la tentation est de plus en plus grande, pour les autorités judiciaires et policières, de s'appuyer sur les flous du droit, pour mettre celles-ci en œuvre. On ne peut totalement exclure, même si cela est très contestable, qu'un juge d'instruction requière un jour l'accès à des bases de données généalogiques. Le droit ne doit plus être à la traîne et dans la dépendance des évolutions techniques et professionnelles : il est grand temps qu'un vaste débat démocratique et transparent sur l'usage des données génétiques à des fins sécuritaires et judiciaires ait lieu pour en fixer les règles et les limites dans le cadre fondamental des droits de l'homme. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR C. MY



devenir de plus en plus fréquent, à chaque fois que la consultation des fichiers nationaux échoue», complète Natalie Ram, de l'université de Baltimore aux Etats-Unis. « Une large proportion de la population des Etats-Unis est répertoriée dans la banque GEDmatch et les personnes qui acceptent que leurs données y soient conservées s'exposent elles-mêmes, mais exposent aussi leur famille », s'inquiète-t-elle.

La fin de l'« ADN poubelle »

Entre avril et août 2018, 13 crimes ont été résolus aux Etats-Unis par des enquêtes fondées sur des recherches dans des banques de données génétiques, et certains acteurs s'engouffrent déjà dans la brèche. La société américaine Parabon NanoLabs, spécialisée dans l'analyse médico-légale d'ADN, a créé un département consacré aux recherches dans les bases de données génétiques. Une centaine de crimes sont en cours d'élucidation grâce à elles.

L'étude publiée dans la revue *Cell* et menée par Noah Rosenberg de l'Université de Stanford en Californie révèle par ailleurs des correspondances inattendues entre les fichiers d'empreintes génétiques de la police nationale et ces bases de données. L'inclusion dans les fichiers de police était initialement conditionnée par des contraintes visant à concilier sécurité et protection de la vie privée. Cette protection était notamment garantie par la restriction de l'analyse à des régions non-codantes du génome, alors qualifiées d'« ADN poubelle » par les généticiens car ils le croyaient dépourvu de signification biologique. Ces scientifiques avaient repéré en différents lieux de ces régions non-codantes la répétition de séquences de nucléotides. Le nombre de ces répétitions varie suivant les individus. L'empreinte génétique consiste en une série de chiffres correspondant au nombre de répétitions en ces différents lieux, qui servent alors de marqueurs. En France, l'empreinte génétique correspond ainsi à 21 marqueurs, contre 20 aux Etats-Unis.

Mais ce concept d'« ADN poubelle » a volé en éclats car les généticiens ont depuis révélé l'existence de liens entre les séquences de ces régions non-codantes et la modulation de certaines régions codantes impliquées dans des maladies ou signant l'origine géographique. Plusieurs études ont ainsi montré des associations entre différents marqueurs du Fichier national automatisé des empreintes génétiques (Fnaeg) avec une maladie rare, la pseudo-hyperkaliémie, ou des maladies coronariennes. Par ailleurs, les endroits du génome utilisés comme marqueurs sont entourés de variations dont certaines sont recherchées dans les tests d'ancestralité. D'où les correspondances. D'après les

résultats de l'étude, environ 30 % des couples parents-enfants et 35 % de couples de frère et sœur pourraient être ainsi retrouvés en comparant les données génétiques présentes dans les fichiers nationaux à celles présentes dans les bases de données généalogiques.

Outre l'accès aux banques de données généalogiques, les recherches familiales sont aussi rendues possibles par des dispositifs législatifs. Aux Pays-Bas, une loi autorise depuis 2012 le recrutement de volontaires pour tenter d'identifier des empreintes ADN apparentées à celles du suspect parmi les membres de sa famille. Une enquête génétique inédite réalisée chez 17 500 volontaires et chez 15 000 suspects a ainsi permis de retrouver le meurtrier présumé de Nicky Verstappen, un garçon de 11 ans, violé et assassiné en 1998 alors qu'il participait à un camp de scouts. Le traité de Prüm signé en 2005, sur la coopération policière et judiciaire entre les Etats européens, permet aussi l'échange d'informations entre les fichiers d'empreintes génétiques de différents pays afin d'augmenter les chances de recoupement avec le profil du suspect.

Nécessité d'encadrement

Autre brèche fendant le cadre juridique des usages de l'ADN, l'analyse de caractères morphologiques tels que la couleur des cheveux, des yeux, de la peau pour tenter d'esquisser des portraits-robots. Autorisés depuis 2003 aux Pays-Bas, avec une référence explicite à la « race », ainsi qu'au Royaume-Uni, ils sont interdits en France ou en Suisse, où la loi limite les recherches aux régions non-codantes de l'ADN. Ce qui n'a pas empêché leur usage dans l'enquête sur les viols en série du 8^e arrondissement de Lyon, à la suite d'un arrêt de la Cour de cassation de 2014. « Ce qu'on désigne par portrait-robot génétique est en fait une caricature qui indique certains traits phénotypiques. Il doit être perçu comme une aide à l'enquêteur ayant pour but de cerner des individus. L'idée est d'apporter des informations plus fiables qu'un simple témoignage ou de venir le conforter. Il ne s'agit pas de le systématiser mais cela permet de relancer une enquête dans les cas où l'information

manque », précise Frédéric Brard, de l'institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale. « L'avis de la Cour de cassation ne fait pas jurisprudence, mais il donne une tonalité selon laquelle, dans un cadre similaire, le législateur considère que c'est acceptable », complète-t-il.

Mais l'absence de cadre juridique définit inquiète les spécialistes en sciences humaines. « La loi insiste sur l'identification, c'est-à-dire sur une série de chiffres qui signent l'empreinte génétique. C'est le dispositif légal qui a été mis en place pour qu'il n'y ait pas de débordement », proteste ainsi la sociologue Gaëlle Krikorian, de Médecins sans frontières. « Si vous mêlez le crime, la génétique et la race, cela produit un mélange explosif », résume l'anthropologue Amade M'Charek de l'université d'Amsterdam. « Les catégories telles que "Afrique de l'Ouest" ou "Europe de l'Ouest" auxquelles se réfèrent les résultats des tests géo-génétiques sont très vagues et sujettes à interprétation en fonction du contexte local », poursuit-elle. Au Royaume-Uni, en 2004, la présence d'ADN originaire d'Afrique de l'Ouest dans l'empreinte génétique d'un suspect a conduit les enquêteurs à cibler la population issue des Caraïbes, localement implantée.

Comment, dès lors, intégrer ces nouveaux usages de manière à renforcer les moyens de l'enquête judiciaire tout en garantissant le droit du citoyen propre à l'état de droit sur lequel se fonde le régime démocratique ? « Ces technologies sont intéressantes, et nous souhaitons tous avoir une police efficace. Mais la question est de savoir comment nous pouvons les utiliser de manière sage, sans criminaliser ou incriminer un groupe ou une population donnée », insiste Amade M'Charek. « Il ne s'agit pas de s'opposer de manière frontale à ces outils, mais de savoir comment on les utilise, pour quoi faire, comment c'est encadré et, au-delà de l'encadrement légal, quel dialogue il y a entre les différents acteurs sur les pratiques et la réflexion politique et éthique sur ces pratiques. Ce dialogue existe au sein des laboratoires, mais la réflexion n'est pas partagée, ce qui fait qu'il n'y a pas de consensus. Le seul cadre est le cadre légal, qui est devenu très bancal » constate Gaëlle Krikorian. « Il n'y a pas de réponse simple à l'encadrement de ces nouveaux usages dont l'enjeu est aussi sociétal », remarque Oriola Sallavaci de l'Anglia Ruskin University au Royaume-Uni. « C'est une question d'équilibre entre la lutte contre la criminalité et la protection de la vie privée. Ces nouveaux usages devraient être étudiés par des comités indépendants dont les membres représenteraient les différentes spécialités impliquées, comme c'est le cas dans le domaine de la bioéthique », conclut-elle. ■

CATHERINE MARY

LE FICHIER QUI GROSSIT, GROSSIT...

En France, le Fichier national automatisé des empreintes génétiques (Fnaeg) a été créé en 1998 et contient les empreintes de 3,8 millions de personnes, soit 5,6 % de la population française, auxquelles s'ajoutent les empreintes de 500 000 traces non identifiées relevées sur des scènes d'infraction. Les données y sont conservées vingt-cinq ans pour une mise en cause et quarante ans en cas de condamnation.

Initialement restreinte aux auteurs de crimes sexuels, l'indication d'inclusion dans le fichier n'a depuis cessé d'être étendue. « Ces banques de données ont été créées dans les années 2000 dans les pays européens, et l'indication de l'analyse génétique s'est progressivement élargie, avec des variations suivant les pays. En Suisse, par exemple, si un suspect est innocenté, son ADN doit être supprimé de la base de données », précise Vincent Castella, du Centre universitaire romand de médecine légale, à Lausanne (Suisse). « Depuis la mise en place du Fnaeg, en 1998, l'ADN a pris une place croissante dans la résolution des affaires », témoigne ainsi Joëlle Vailly, de l'Ecole des hautes études en sciences sociales, qui a coordonné le projet « Fichiers et témoins génétiques », financé par l'Agence nationale de la recherche. « A sa création, il était réservé aux personnes condamnées pour crimes sexuels puis il a été élargi aux autres crimes, mais aussi aux délits tels que les vols, les cambriolages, par les lois de 2001 et 2003 de sécurité intérieure et de sécurité quotidienne. Le fichage a aussi été étendu aux suspects », poursuit-elle. « J'ai assisté au prélèvement [ADN] de personnes qui avaient refusé de donner leurs lunettes de piscine dans une manifestation », s'indigne Gaëlle Krikorian, sociologue et responsable à Médecins sans frontières. En juin 2017, la Cour européenne des droits de l'homme a condamné la France pour « atteinte disproportionnée à la vie privée », insistant sur le manque de hiérarchie dans la gravité et la nature des infractions justifiant le fichage.

Au total, 30 000 rapprochements sont effectués chaque année concernant autant les infractions sévères, crimes ou viols, que les cambriolages. La consultation du Fnaeg résulte soit de la demande d'un magistrat, soit de celle d'un laboratoire de la police nationale ou d'un laboratoire privé habilité par le ministère de la justice afin d'analyser le matériel génétique prélevé sur une scène de crime ou d'infraction. Si ces analyses permettent parfois la résolution de crimes anciens, leur contribution à la résolution des affaires a été jusqu'à présent peu évaluée.

Une étude menée par l'université de Lorraine portant sur 2 439 décisions rendues pour des affaires criminelles et correctionnelles de Meurthe-et-Moselle, entre 2003 et 2013, montre que l'exploitation des informations génétiques peut être utile à la procédure pénale, mais qu'il est rare qu'elles déterminent à elles seules l'établissement de la preuve. Ce ne fut ainsi le cas que pour 2 des 82 affaires criminelles étudiées et pour 13 de l'ensemble des affaires considérées, soit 0,5 %.

■ C. MY

LE LIVRE

La SF à l'épreuve de la science

Le premier titre de la collection « Parallaxe » des éditions Le Béal' interroge la science-fiction au cinéma par le prisme de la science

Astrophysicien au CEA (Commissariat à l'énergie atomique), auteur de nombreux ouvrages de vulgarisation scientifique, ancien chroniqueur du supplément « Science & Médecine » du Monde, Roland Lehoucq vient d'ajouter une corde à son arc en prenant la direction de la nouvelle collection « Parallaxe », aux éditions du Béal'. « Parallaxe » a pour ambition de faire dialoguer science-fiction et science, notamment en soumettant la première à l'épreuve de la seconde. Le tout premier titre de cette collection, *La science fait son cinéma*, compilation des chroniques que signent Roland Lehoucq et son complice paléontologue Jean-Sébastien Steyer dans le trimestriel *Bifrost*, passe à la moulINETte de la physique et de la biologie quelques-uns des plus célèbres films de SF. Le but de l'exercice n'est pas de dézinguer les longs-métrages coupables d'entorses aux sacro-saintes lois scientifiques. La démarche reste toujours pédagogique : il s'agit, à chaque fois, de prendre un film et de le considérer « comme une sorte de documentaire, et ses images comme factuelles. Il devient alors l'énoncé d'un exercice intéressant et soulève de nombreuses questions : cette planète est-elle réaliste ? Pourquoi cet extraterrestre possède-t-il trois paires d'yeux ? Comment fonctionne ce vaisseau spatial ? »

Extrapolation
En effet, autant le public est prompt à voir les contradictions scénaristiques des films, autant il lui est plus difficile d'en pointer les incohérences scientifiques. L'ouvrage a donc pour objectif de développer l'analyse et l'esprit critique, voire « de jouer avec les sciences ». Le tout sans forcément détruire la part de rêve : Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steyer accordent avec mansuétude des circonstances atténuantes aux réalisateurs qui s'autorisent un peu de « mou » avec la rigueur. « Liberté artistique et extrapolation scientifique font partie du jeu », admettent-ils. Ainsi, il est beaucoup pardonné à *l'Interstellar* de Christopher Nolan (2014), qui a eu le mérite non négligeable d'entraîner le spectateur sur les franges étranges de la théorie des cordes et sur celles d'un trou noir, l'initiant aux joies de la dilatation du temps dans le cadre de la relativité einsteinienne. On sourit aussi en découvrant les pièges dans lesquels on est soi-même tombé. Ainsi, en acceptant l'idée qu'Ant-Man (héros éponyme du film de Peyton Reed sorti en 2015) puisse supprimer une partie du vide présent dans la matière et ainsi se contracter jusqu'à atteindre la taille d'un insecte, il était jouissif de le voir se promener sur le dos d'une fourmi volante. Mais il est tout aussi jouissif de s'apercevoir que ce Lilliputien d'un nouveau genre a en réalité conservé sa masse initiale et ne peut donc être soulevé par un frêle hyménoptère : 75 kg moins du vide font toujours 75 kg... Eh oui. ■

PIERRE BARTHÉLÉMY

La science fait son cinéma, de Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steyer (éditions Le Béal', 256 p., 14,90 €).

LIVRAISON

JEUNESSE
« Carnet de l'apprenti scientifique »
Voici réédité ce qui, en 2009, s'appelait *L'Agenda de l'apprenti scientifique* et qui vise à faire découvrir la démarche scientifique aux enfants à partir de 7 ans. Chaque page, imitant un cahier à carreaux d'écolier, propose des expériences simples à réaliser, et le scientifique en herbe est invité à noter ses propres observations. Trois cents expériences en physique, chimie, sciences de la vie sont proposées, regroupées en plus d'une vingtaine de thématiques. > De Nicole Ostrowsky et Theresa Bronn (De La Martinière Jeunesse, 300 p., 14,90 €).



LA MEILLEURE PHOTOGRAPHIE D'ASTRONOMIE DE L'ANNÉE

Intitulé *Transporter l'âme*, ce cliché de l'Américain Brad Goldpaint a reçu le Prix de la meilleure photographie d'astronomie de 2018, décerné par les Musées royaux de Greenwich (Royaume-Uni). Prise au sommet de canyons de l'Utah, cette image montre notamment la Voie lactée à droite. En raison de son long temps de pose (20 secondes), la photographie donne l'impression étrange de nuit en plein jour. Le paysage désertique est éclairé par une lune à son quartier qui brille néanmoins comme un soleil. L'œuvre de Brad Goldpaint a été sélectionnée parmi quelque 4200 clichés venus de 91 pays. Cette compétition, dont 2018 marquait la dixième édition, récompense les photographes dans une dizaine de catégories. Le Français Nicolas Lefaudeaux l'a emporté dans les catégories « Aurores » et « Notre Soleil ». Les images gagnantes sont à retrouver sur le site Rmg.co.uk.
(PHOTO : BRAD GOLDPAINT/2017 GOLDPAINT PHOTOGRAPHY/ALL RIGHTS RESERVED)



DIX MILLE PAS ET PLUS

« CORPS ET SPORT », UNE EXPOSITION À MESSAGE

Par CATHERINE PACARY

De la radio, le matin, au journal du soir, des notifications Internet aux SMS et mails publicitaires, nul ne peut l'ignorer : le sport est bon pour la santé. Mais pourquoi ? Comment ? Jusqu'à quel point ? L'exposition « Corps et sport », qui s'installe à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, pour quinze mois, répond à un nombre record de questions en disséquant les effets du sport sur notre corps. Comme toujours à La Villette, le fond est traité avec rigueur quand la forme, ludique et participative, vise un public le plus vaste possible, de l'adepte du « no sport » churchillien à l'athlète de haut niveau, de l'enfant au grand-parent. Avec, en fil rouge, un message : bougez ! Très dense, concentrée sur 1200 mètres carrés, « Corps et sport » se scinde en deux grands ensembles. Le premier, expérimental, amène le visiteur à tester cinq ateliers : football, escalade, biathlon, tennis, entraînement et boxe. Les gestes sportifs, comme un tir ou un service, trop rapides pour l'œil humain, sont décomposés et comparés à ceux de champions dont le mouvement a été modélisé par ordinateur. Outre le plaisir de jouer, le visiteur peut repartir avec sa chronophotographie sous le bras.

Le second, analytique, retrace l'évolution de la représentation du sport dans la société, du Discobole à la sportification actuelle. Là encore, de multiples questions sont posées. Parmi elles : quelle souffrance peut-on accepter ? Quatre films illustrent ce thème, dont celui sur l'entraînement du boxeur français Souleymane Cissokho, jusqu'à l'épuisement, ou la séquence montrant le skippeur Damien Seguin, né sans main gauche, triple médaillé paralympique et qui s'aligne pour la prochaine Route du rhum. Autre interrogation, chère à Jean-François Toussaint, commissaire scientifique de l'exposition : quelles sont les limites physiques de la performance ?

Des jeunes qui ne bougent pas assez
Loin d'être éludé, le dopage est présenté sous toutes ses acceptions, du dopage d'Etat aux actuelles modalités de contrôle. « Il est admis que 10 % à 15 % des sportifs sont dopés », estime Evelyne Hiard, biologiste et co-commissaire de l'exposition, tout en pointant la crainte, à l'avenir, d'un dopage génétique.

Mais ce n'est pas le sujet qui inquiète ici le plus : « Chaque année, 5,3 millions de morts sont imputables à la sédentarité dans le monde [étude 2012 de la Harvard Medical School, publiée dans *The Lancet*], soit plus

que le tabagisme [5,1 millions selon l'OMS] », souligne M^{me} Hiard. D'où le message placardé dans la dernière salle sur « les bienfaits du sport sur la santé ». Un tableau décline, à l'aide d'exemples du quotidien, l'activité journalière idéale en trois paliers : 45 minutes d'activité de faible intensité, comme faire la vaisselle ou la poussière ; puis 30 minutes d'activité de moyenne intensité (comme laver les carreaux) ; enfin, 20 minutes d'effort intense.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce sont les jeunes qui ne bougent pas assez. Selon l'OMS toujours (chiffres de 2017), dans le monde, 23 % des adultes ne se remuent pas assez pour 81 % des adolescents scolarisés. « Un enfant fait en moyenne six heures d'écran chaque jour », rappelle Evelyne Hiard, alors qu'il a besoin d'autant, soit six heures, d'activité physique. A la sortie, pas d'écran tactile, mais le catalogue, avec son équivalent pour enfant, mis à disposition sur une table, devant un compte à rebours qui s'égrenera jusqu'au 20 août 2024, jour d'ouverture des Jeux olympiques de Paris. ■

Corps et sport, cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, Paris 19^e. Jusqu'au 5 janvier 2020.

AFFAIRE DE LOGIQUE – N° 1074

Questions subsidiaires autoréférentes

Voici les deux questions subsidiaires du concours. La première influera sur votre score 1, la deuxième sur votre score 2. Tout le monde peut répondre, mais seules les réponses faites par les participants ayant déjà marqué au moins 1 point dans le concours seront prises en compte pour déterminer les scores. Pour chaque question, vous marquerez (10 – N) points, où N est le nombre de joueurs (autres que vous) de la catégorie indiquée dans la question ayant répondu le même nombre que vous. Si N est supérieur à 10 ou si vous ne répondez pas, vous marquerez 0 point.
1. Quel nombre entier compris entre 1 et 20 sera le moins choisi par les « amateurs » qui répondront à cette question ?
2. Quel nombre entier compris entre 1 et 30 sera le moins choisi par les « experts » qui répondront à cette question ?
Comme toujours, les amateurs seront départagés par le score 1 puis le 2, les experts par le score 2 puis le 1.

Répondre avant le 6/11 minuit sur www.affairedelogique.com

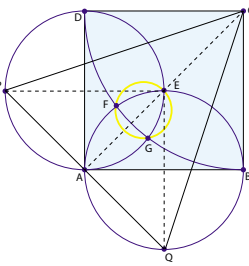
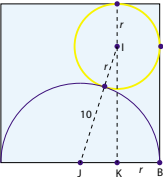
CONCOURS 2018 : UNE QUESTION POUR VOUS DÉPARTAGER Eh oui, vous êtes trop forts, beaucoup trop nombreux avec le nombre maximal de points. Alors, il a fallu trouver une question subsidiaire qui vous départage en faisant davantage jouer l'intuition que la rigueur. C'est ce que vous propose la question ci-dessus, réservée aux joueurs ayant marqué au moins un point lors des précédentes questions. Le but est, pour chacune des questions, de donner un nombre qu'un minimum des autres joueurs (amateurs ou experts selon le cas) aura choisi. Le score décrit dans chaque question (entre 0 et 10) départagera les ex aequo. <i>Détails sur www.affairedelogique.com</i>	LA REMISE DES PRIX LE 2/12 AU MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS Comme lors du concours 2017, les résultats seront proclamés au musée des Arts et Métiers lors d'une journée <i>Tangente</i> ouverte gratuitement au public le dimanche 2 décembre. Cette journée, organisée sur le thème « Mathématiques, littérature, jeu et informatique », accueillera des expositions, des ateliers, des signatures de livres et de nombreuses animations. Elle se terminera par la remise des trophées <i>Tangente</i> : des prix de littérature et d'informatique (autour du jeu) ainsi que ceux du concours <i>Affaire de logique</i> . Ne manquez pas cette journée dont nous vous reparlerons prochainement. <i>Informations sur www.tangente-mag.com</i>	LES PARTENAIRES QUI ONT DOTÉ LE CONCOURS Le concours <i>Affaire de logique</i> est doté par le magazine <i>Tangente</i> et par ses partenaires : <i>Le Monde</i> , Hewlett Packard, la SCM (Société de calcul mathématique), les éditions Cassini et la Fondation Cartier. Les récompenses seront au moins au nombre de 100 pour les experts et de 50 pour les amateurs. Les prix décernés : une œuvre d'art pour les vainqueurs, 50 applications mobiles HP Prime, 40 beaux livres autour des mathématiques, 40 abonnements à <i>Tangente</i> (numériques et papier), 10 invitations pour deux personnes à l'exposition <i>Géométries Sud</i> de la Fondation Cartier... <i>Informations sur www.affairedelogique.com</i>
---	---	---

E. BUSSER, G. COHEN ET J.L. LEGRAND © POLE 2018

affairedelogique@poleditions.com

Solution du problème 1072

1. Le rayon du grand cercle jaune est environ 5,36 cm.
r est le rayon du grand cercle jaune, I son centre, K le projeté orthogonal de I sur [AB] et J le milieu de [AB], centre du demi-cercle. On a : IJ = 10 + *r*, IK = 20 – *r*, JK = 10 – *r*. Le théorème de Pythagore permet d'écrire : IJ² = IK² + JK², soit, après réduction, (*r* – 40)² = 1200. *r* étant plus petit que 10, la seule solution acceptable est *r* = 40 – 20√3 ≈ 5,36.
2. Le rayon du petit cercle jaune est environ 3,54 cm.
On trace le triangle isocèle CPQ où PQ est perpendiculaire à AC et de même longueur, A étant le milieu de PQ. On montre, en utilisant les angles inscrits aux différents arcs de cercle, que les côtés du triangle EFG sont parallèles à ceux du triangle CPQ et de longueur cinq fois moindre. C'est dire qu'il existe une homothétie de rapport 1/5 qui transforme CPQ en EFG. Ainsi, le rayon du petit cercle jaune est-il égal au 1/5 de celui du cercle circonscrit au triangle CPQ. En projetant le centre de ce cercle sur CQ, on obtient son rayon (égal à CQ²/2AC), et donc le rayon du petit cercle jaune : (5√2)/2 ≈ 3,54.



CARTE
BLANCHE« *Listeria* »,
la bactérie
qui électrise

Par ALICE LEBRETON

Peut-on encore trouver du nouveau sur un microbe qui sert de modèle d'études en infectiologie depuis plus de quatre-vingt-dix ans ? Alors que l'on me pose régulièrement cette question légitime, je suis tombée avec délice sur une découverte totalement inattendue, publiée le 4 octobre dans *Nature* par l'équipe de Daniel Portnoy à Berkeley : *Listeria monocytogenes*, l'agent responsable de la listériose, produit de l'électricité !

Plus exactement, *Listeria* a la propriété d'exporter des électrons vers sa surface, puis de les donner à qui veut – à une électrode de graphite immergée dans son milieu de culture, par exemple. Avec un montage électrochimique approprié, *Listeria* devient ainsi un composant de pile ; en cédant ses électrons à l'anode, elle génère un courant mesurable de quelques microampères par centimètre carré dans le circuit électrique.

Cette faculté n'est pas nouvelle en soi ; elle avait déjà été mise en évidence chez différentes bactéries vivant dans des sédiments lacustres ou marins. Le principe en est relativement simple : pour produire leur énergie, beaucoup d'organismes transforment les sucres en dioxyde de carbone, par une série de réactions d'oxydo-réduction appelée respiration. Les électrons libérés lors de l'oxydation des sucres sont transférés à une molécule oxydante – souvent l'oxygène. Comme cette molécule diffuse librement à l'intérieur des cellules, la réaction s'effectue localement, et donc aucun électron n'est émis dans le milieu extérieur ; aucun courant n'est généré.

L'exception ou la règle ?

Toutefois, certaines bactéries comme *Geobacter metallireducens* ou *Shewanella oneidensis*, qui vivent dans des milieux très minéralisés et pauvres en oxygène, peuvent utiliser l'oxyde ferrique (la rouille) ou d'autres oxydes métalliques comme accepteurs d'électrons à la place de l'oxygène. Pour ceci, un échangeur moléculaire baptisé transfert d'électrons extracellulaire (EET) conduit les électrons produits lors de la respiration vers la surface bactérienne, au contact des oxydes métalliques du substrat. En présence d'une électrode, l'EET crée un courant électrique.

La grande surprise dévoilée par l'article de Samuel Light, Daniel Portnoy et leurs collaborateurs est l'existence d'un tel mécanisme chez une bactérie pathogène opportuniste pour l'homme. L'idée leur est venue d'un article vieux de vingt-cinq ans, qui montrait que *Listeria* pouvait réduire l'oxyde ferrique ; ils en ont déduit que *Listeria* devait également être capable de générer un courant électrique, ce qu'ils ont ensuite confirmé. Cependant, la structure cellulaire de *Listeria* est incompatible avec les systèmes d'EET connus, et son génome n'en porte d'ailleurs pas la trace. En sélectionnant des mutants de *Listeria* incapables de réduire l'oxyde de fer, les auteurs ont alors mis en évidence et caractérisé en détail un nouveau type d'EET, radicalement différent de ceux de *Geobacter* et *Shewanella*.

Est-ce l'exception ou la règle ? Le groupe de Daniel Portnoy a recherché et trouvé, chez d'autres espèces bactériennes, des séquences d'ADN semblables à celles des gènes qui assurent l'EET de *Listeria*. Même si *Listeria* reste championne parmi les espèces testées, il s'avère que des bactéries aux modes de vie extrêmement variés peuvent réduire l'oxyde ferrique, qu'elles soient environnementales, commensales ou pathogènes, qu'elles tolèrent l'oxygène ou pas. Reste encore à comprendre dans quelles conditions l'EET est employé par *Listeria* et ses cousines, et quels avantages il leur confère dans la nature ou lors d'une infection...

Voire, pourquoi pas, en tirer parti ? Nourrirait-on un jour *Listeria* afin qu'elle produise notre électricité ou qu'elle recycle des oxydes métalliques, au lieu qu'elle se joue toujours de nous ? En attendant cet avènement, retournons à nos boîtes de Petri. Qui sait quelle autre curiosité s'y cache ? ■

Alice Lebreton

Chargée de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), Institut de biologie de l'Ecole normale supérieure.

Canulars scientifiques,
revues prédatrices et « slow science »

TRIBUNE - Face aux dérives du monde de l'édition scientifique, plusieurs auteurs appellent à des changements radicaux invitant à décélérer le rythme de publication

On fait grand cas aux Etats-Unis, et maintenant en France, du canular « Sokal au carré ». Imitant l'original, perpétré par Alan Sokal en 1996, trois personnes ont voulu cette fois dénoncer la contamination par le « politiquement correct » et l'activisme justicier des études consacrées à la race, au genre, à la masculinité, etc. L'interprétation ultime de ce canular reste contestée, mais retenons ici qu'il pointe un supposé problème concernant l'évaluation par les pairs dans les revues scientifiques, évaluation apparemment prise en défaut par les nombreux articles bidon que le trio américain a réussi à publier. Même si le Landerneau académique américain s'excite une fois de plus avec cette énième critique du « post-modernisme », il faut distinguer ces disputes idéologiques de la question plus importante de l'évaluation par les pairs et de la multiplication des revues de qualité douteuse.

Le problème de l'édition scientifique est en effet plus général et dépasse les seules sciences sociales. Les études sur les revues dites « prédatrices » que nous avons réunies dans un récent dossier de la revue *Zilsel* le montrent amplement. Mimant les revues scientifiques « authentiques » et établies, elles affectent de proposer une évaluation par les pairs ; en réalité, elles publient tout et n'importe quoi, moyennant finances. Leurs éditeurs se comptent par centaines, les titres par dizaines de milliers et continuent de croître. Les autorités académiques s'en émeuvent, et on a récemment indiqué qu'un pourcentage notable de chercheurs français y publient. Des primes et des promotions

sont parfois même attribuées aux auteurs d'articles parus dans ces revues supposées « prédatrices ».

On pourrait croire a priori que le problème est circonscrit : il y aurait de vraies et de fausses revues scientifiques, tout comme il y a des vrais et des faux Vuitton. Dans les premières, on paierait pour lire, tandis que dans les secondes on paierait pour publier. Or, les conclusions auxquelles nous aboutissons sont plus troublantes. Les revues prédatrices, au fond, sont indissociables du monde de la recherche contemporaine, parce qu'elles prospèrent sur ses transformations.

Leur essor s'appuie sur la concurrence généralisée qui, par l'introduction de courses aux gros financements, régit désormais la recherche scientifique internationale. La publication aujourd'hui est une unité comptable de la grandeur scientifique d'un chercheur ou d'un laboratoire, en plus (ou avant) d'être une unité de savoir, à lire, développer et critiquer. D'où le célèbre « publish or perish » [« publier ou périr »]. Résultat collatéral : ils sont aujourd'hui inondés de courriels leur proposant de publier dans ces revues (ou de participer à des congrès analogues). Les chercheurs peuvent ne pas connaître tous les titres douteux et y publier de bonne foi des résultats valides. De la sorte, le contenu de ces revues n'est pas systématiquement mauvais, ce qui fissure ainsi la frontière entre revues « sérieuses » et « prédatrices » et risque d'accentuer la dilution de la science mal ou vite faite dans la science vraiment validée par les pairs. Inversement, les responsables de la sélection

**LES CHERCHEURS
PEUVENT NE PAS
CONNAÎTRE
TOUS LES TITRES
DOUTEUX,
ET Y PUBLIER
DE BONNE FOI DES
RÉSULTATS VALIDES**

des chercheurs ou des projets – jugeant quasi exclusivement sur la base de listes de publication – peuvent méconnaître ces revues et donc promouvoir dans la science authentique des adeptes de la science frelatée...

Les revues prédatrices étant celles où l'on publie en quelque sorte à compte d'auteur, cela donne l'impression que les revues des grands groupes sont « gratuites ». Or, les mastodontes de l'oligopole de l'édition scientifique (Wiley, Elsevier, Springer, et Taylor & Francis), ponctionnent d'autres acteurs de la chaîne de production et de diffusion de la recherche. Les bibliothèques et les institutions scientifiques paient en effet pour que les chercheurs puissent lire des articles soumis « gratuitement », ou bien elles paient jusqu'à 5 000 dollars par article afin de publier en libre accès, y compris dans les revues de haut niveau.

Si le modèle du « chercheur payeur » a facilité l'émergence des revues prédatrices, il existe maintenant une porosité entre les grands groupes de l'édition et de telles revues. Ainsi les

facétieux « canuleurs » américains avaient d'abord publié un premier article, intitulé « Pénis conceptuel », dans une revue d'études de genre en libre accès de très bas niveau, que d'aucuns considèrent comme prédatrice, pour tant propriété du groupe Taylor & Francis. Ces nouvelles revues portées par des éditeurs reconnus ne font que recycler – pour quelques centaines d'euros – les articles rejetés par les revues les plus prestigieuses des mêmes groupes.

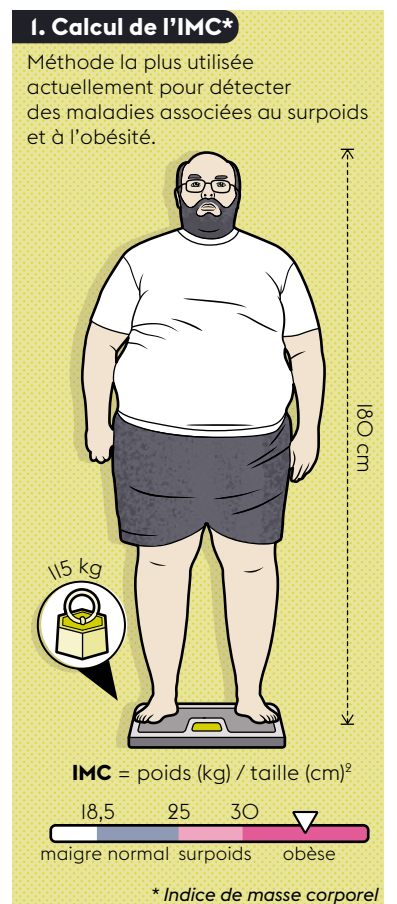
Les revues prédatrices ne forment donc pas un monde à part ; elles vivent des aberrations du modèle de la recherche scientifique normalisé (compétition effrénée et article comme seule unité comptable d'évaluation), et accompagnent la dérive managériale de la recherche, avec ses « tableaux de bord » et ses mesures d'« impact » à court terme. C'est pourquoi ces dysfonctionnements de l'édition scientifique appellent des mesures radicales, à commencer par la décélération et la *slow science*. Car à publier tant de *fast science* qui devient vite de la « fausse science », l'on court le risque de dévaloriser les sciences et de ruiner la confiance dans les vérités qu'elles mettent au jour. ■

¶ **Jean Frances**, sociologue, chercheur associé au GSPR/EHESS ; **Yves Gingras**, chaire de recherche du Canada en histoire et sociologie des sciences, UQAM ; **Philippe Huneman**, directeur de recherche en philosophie au CNRS, IHPST (Paris) ; **Arnaud Saint-Martin**, chargé de recherche en sociologie au CNRS, CESSP (Paris).

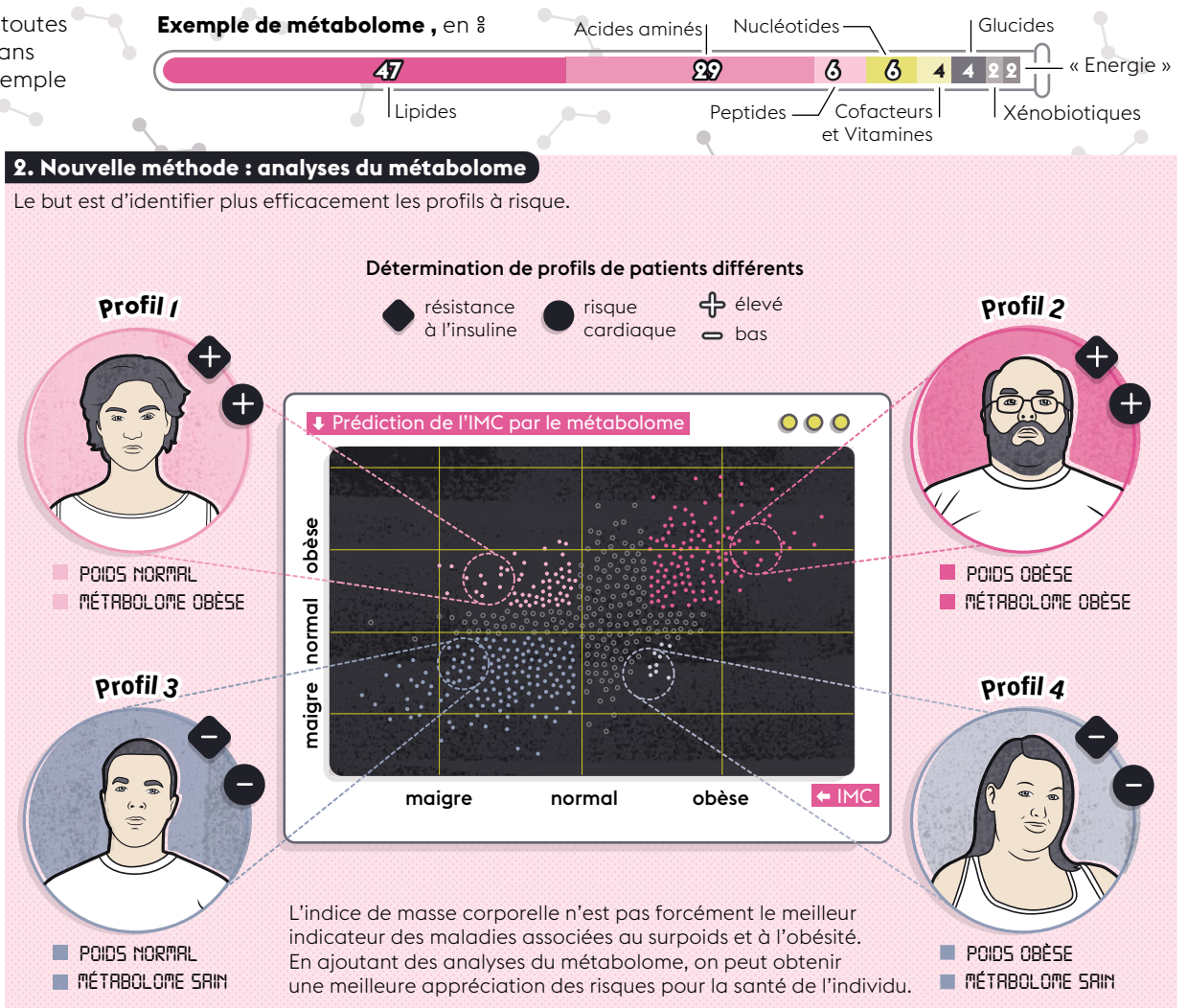
Le supplément « Science & médecine » publie chaque semaine une tribune libre. Si vous souhaitez soumettre un texte, prière de l'adresser à sciences@lemonde.fr

LE MÉTABOLOME POUR MESURER LES RISQUES D'OBÉSITÉ

Le **métabolome** est la somme de toutes les petites molécules présentes dans un échantillon biologique, par exemple le plasma sanguin.



SOURCES : CERULLI ET AL., CELL METABOLISM



INFOGRAPHIE : AUDREY LAGADEC

L'obésité, dont la prévalence mondiale a triplé depuis 1975 pour atteindre 13 % (et 39 % de personnes en surpoids), est un facteur de risque de diabète, de cancer et de maladies cardiaques. Mais la corrélation n'est pas toujours directe

entre indice de masse corporelle (IMC), qui mesure l'obésité, et ces pathologies. C'est pourquoi une équipe du Scripps Research Institute (Californie) a étudié le métabolome, l'ensemble des petites molécules (lipides, glucides, etc.), les

métabolites, présentes dans le plasma sanguin, pour mieux cerner ce lien. Elle a constaté, sur 2400 personnes, que les variations de composition du métabolome sont corrélées au changement de poids. Une liste de 49 métabolites,

sur plus de 300, suffit à prédire le risque. Armé de ce constat, les chercheurs ont identifié des personnes ayant des risques sanitaires différents, alors qu'ils avaient le même IMC. ■

DAVID LAROUSSE

Jean-François Bonnefon trace sa route en toute autonomie

PORTRAIT - Le chercheur français en psychologie a acquis une renommée mondiale en étudiant les dilemmes moraux posés aux véhicules sans chauffeur

Jean-François Bonnefon est proprement désarmant. Posez-lui n'importe quelle question, scientifique ou personnelle, complexe ou ridiculement naïve, et le psychologue vous répondra avec une franchise, une patience, une pédagogie, une douceur déconcertantes. Le tout accompagné d'une modestie rare. Ses amis vantent son savoir littéraire ? Il admet « une bonne connaissance des romans de science-fiction ». Ils notent sa culture musicale tous azimuts ? « Mon père jouait du jazz, ma mère était prof de musique. J'écoutais des opéras à l'école primaire. Mais j'ai arrêté à l'adolescence, et je n'ai jamais été capable de jouer d'un instrument. » Ses collègues louent son brio scientifique, sa précocité, ce recrutement au CNRS en 2004, six mois après sa soutenance de thèse ? « Un concours de circonstances, jure-t-il. Le mouvement Sauvons la recherche avait abouti à multiplier par deux le nombre de postes cette année-là. J'étais en liste d'attente, je suis rentré. » Quant au « niveau impressionnant » qu'il afficherait en informatique, au dire même des spécialistes du domaine avec lesquels il collabore, il évacue : « Je suis né en 1973, j'ai grandi avec les premiers ordinateurs domestiques et j'étais un geek. »

Tout semble simple, transparent. Prenez la voiture autonome, le sujet qui vaut à l'universitaire toulousain une célébrité mondiale, une invitation d'un an au prestigieux Massachusetts Institute of Technology (MIT) et une récente publication dans la revue *Nature*. Dans l'article « The Moral Machine Experiment (l'expérience de la machine morale) », publié le 24 octobre, lui et ses collègues imaginent des dilemmes moraux imposés au véhicule sans chauffeur et demandent aux humains le choix qu'ils feraient. Ecraser trois chiens ou percuter un mur et tuer un passager ? Privilégier les enfants ou donner la même valeur à toute vie ? Quid du sexe, de l'état de santé, de la condition sociale, du respect des feux par les piétons ?

« Une sorte d'illumination »

Depuis quatre ans, Jean-François Bonnefon surfe sur le sujet, publiant dans les plus grandes revues avec toujours une vague d'avance. Son secret ? « Une curiosité hors du commun et un grand talent pour poser des questions originales », diagnostique Catherine Casamatta, professeure de finance à l'université Toulouse-1 Capitole. Lui, oppose une réponse plus simple : « J'ai eu une sorte d'illumination. J'ai réalisé que les voitures autonomes étaient à la confluence de tout ce qui m'intéressait : la disruption liée à l'arrivée de l'intelligence artificielle dans le quotidien, la dimension morale des choix qui vont s'imposer à la voiture, l'aspect financier – les automobilistes vont-ils acheter ? – et enfin une question politique : les gens vont-ils vouloir que le gouvernement réglemente ? »

La trajectoire professionnelle de Jean-François Bonnefon semble, il est vrai, un long et brillant prélude vers cette exposition mondiale. On avait lâché le geek à l'adolescence, entre clavier et jeu de rôle. On le retrouve en maths sup, puis maths spé. « Là, j'ai réalisé que je n'avais jamais rien choisi, juste toujours suivi la pente la plus abrupte, et que ces études menaient à des métiers dont je n'avais pas envie. » Il arrête et pendant un an, il papillonne. Biologie, langues, lettres classiques et enfin psychologie. « Comme 80 % des étudiants, je n'y allais pas pour comprendre les autres, mais pour me comprendre moi-même. Et ce luxe de s'autoriser l'introspection me plaisait beaucoup. La discipline était très segmentée : psychologie de l'enfant, psychopathologie, psychologie des groupes. Tout m'intéressait mais sans passion. Puis dans un cours de psychologie cognitive, j'ai découvert que des psychologues étudiaient la façon dont les gens faisaient des maths, de la logique. Pour moi qui aimais les maths, c'était une révélation. »

Le voilà plongé dans la psychologie cognitive. Il s'affaire à voir si l'humain, l'air de rien, ne suivrait pas les modes de raisonnement privilégiés par les chercheurs en intelligence artificielle. « J'étais en thèse, lui en maîtrise, mais il était déjà brillant. Au point que les deux maîtres de l'intelligence artificielle de l'époque, Didier Dubois et Henri Prade, sont venus écouter sa soutenance », se souvient son collègue et ami Eric Raufaste, professeur de psychologie cognitive à l'université Jean-Jaurès. Ce qui, vu par l'intéressé, donne : « Je voulais tester sur les gens la logique possibiliste qu'ils avaient inventée, mais je ne comprenais pas leurs thèses. Ils ont été d'une patience incroyable, sans doute attendris par ma naïveté. »



Jean-François Bonnefon, le 18 octobre.
M. SCOTT BRAUER POUR « LE MONDE »

Depuis, Jean-François Bonnefon a plus impressionné qu'attendri. En 2008, dix ans après cette fameuse maîtrise, il décroche la médaille de bronze du CNRS, le Graal des jeunes chercheurs. Le psychologue n'a pas tout à fait abandonné les machines intelligentes, mais il a surtout creusé le filon humain et la théorie de la décision, la perception du risque, des incertitudes. « Par exemple, comment les gens comprennent la notion de possibles effets secondaires... »

Il multiplie les terrains de jeu, accumule les expériences, dirige notamment le laboratoire de psychologie et de linguistique de l'université Jean-Jaurès. Personne ne rêve encore de voiture sans chauffeur, mais lui se demande déjà, avec son collègue Bastien Trémolière, comment la pensée de la mort affecte les choix des gens. Ou encore la part d'intuition et de réflexion dans nos décisions.

Analyse des choix

La psychologie morale, le sujet d'une vie pour certains. Sauf que la vie est courte et foisonnante. Jean-François Bonnefon part donc la croquer chez les voisins de l'Ecole d'économie de Toulouse (TSE). « Ils ont des thèses rafraîchissantes, explique-t-il. Les points de départ sont toujours très simples, ensuite on raffine. » Le voilà qui étudie la rationalité des décisions, incluant cette fois des variables financières ou la capacité à prédire un choix en observant le visage de l'intéressé. Il monte un site Web participatif articulé autour d'un jeu de rôle. Une expérience qu'il mettra encore à profit lorsqu'en 2016 il lancera Moral Machine, ce site viral sur la voiture autonome, qui a rassemblé plus de 2,5 millions d'internautes de plus de 200 pays, impressionnante base de données et support du récent article de *Nature*. Cette dernière aventure ne concentre pas l'intégralité de son temps. Trop

de projets débordent de ses cartons. Dernier en date, lancé cet été, juste avant son départ pour Boston : une demande de financement européen sur les « nouveaux dilemmes », ceux qui se posent dans la gestion des priorités pour les dons d'organe (âge, délai d'attente, condition médicale...), ou dans l'évaluation des risques de récidive avant des remises en liberté conditionnelles de détenus. « Ce sont toujours des arbitrages entre équité et efficacité, et toujours des algorithmes d'intelligence artificielle qui imposent aux humains de faire des choix », explique-t-il.

Pas si loin, donc, de la voiture autonome, cœur de son escapade américaine et responsable de son nouveau statut. Tel un jeune footballeur français prêté pour un an au FC Barcelone, le voilà à la conquête du MIT, le saint des saints de la recherche mondiale. Il faut entendre ses nouveaux collègues vanter « sa rapidité », « son originalité », ou encore, comme le dit l'informaticien Iyad Rahwan, « sa maîtrise étonnante des outils statistiques, pas si fréquente chez les psychologues ». D'une pirouette, il évacue une nouvelle fois : « Je n'avais jamais fait de postdoc [recherche postdoctorale] ni quitté Toulouse. Alors, comme ça, on cessera de me prendre pour le péquenaud du coin... »

Dans ce paysage d'une déconcertante honnêteté, Jean-François Bonnefon avait toutefois oublié un détail, que l'un de ses collègues a fini par nous confier : il ne conduit pas. Presque un lien d'intérêt pour une vedette des voitures autonomes ? Sa réponse est venue par mail. « Haha. C'est vrai, j'ai le permis, mais je n'ai pas pris le volant depuis quinze ans. Je suis trop dangereux, et ma famille me l'interdit. Je suis le client parfait pour les voitures autonomes, qui quel que soit leur niveau de sécurité, conduiront toujours mieux que moi. » ■

NATHANIEL HERZBERG



ZOOLOGIE

Un éléphant, ça compte énormément

L'éléphant a un gros cerveau, c'est entendu ; une mémoire légendaire, parfait. Mais, jusqu'ici, personne n'avait repéré chez le pachyderme la bosse des maths. Une équipe japonaise vient pourtant de mettre en évidence, chez un éléphant d'Asie du zoo d'Uneo, une capacité rare à manier les quantités numériques. Les exploits d'Authai – 14 ans mais pas toutes ses défenses – viennent d'être décrits dans le *Journal of Ethology*.

Pour étudier la jeune femelle, la spécialiste des éléphants Naoko Irie a conçu un dispositif novateur : un écran tactile géant à la mesure du pachyderme. Confrontée à deux images, Authai a d'abord appris à utiliser le dispositif afin d'indiquer laquelle contenait davantage d'éléments : une bonne réponse valait récompense de fruits. Double dose si la réponse intervenait en moins de trente secondes. Puis l'animal a commencé les tests. Des couples d'images contenant chacune 1 à 10 éléments – bananes, pommes, pastèques... – lui ont été présentées. Les fruits étaient de tailles variables, afin que la rusée ne se contente pas de regarder quel écran était le plus rempli. Authai devait choisir avec sa trompe.

Les résultats se sont avérés « très convainquants », estime l'éthologue japonaise, puisque le taux de bonnes réponses atteint 66,8 %. « Surtout, ce taux n'est pas affecté par la distance entre les deux quantités, leur ratio ou encore leur taille, souligne-t-elle. C'est unique chez les animaux. Authai prend simplement davantage de temps pour répondre quand l'écart est plus faible et le ratio plus grand. »



Authai devant l'écran tactile. JAPAN ETHOLOGICAL SOCIETY AND SPRINGER JAPAN KK, SPRINGER NATURE 2018

Pour bien mesurer l'enjeu, il convient d'abord de savoir que de nombreux animaux peuvent dénombrer des objets, mais seulement jusqu'à 4 ou 5. Grands singes, oiseaux, parfois même insectes. Etonnamment, cette limite correspond plus ou moins à notre propre capacité à identifier une quantité de façon instantanée. Passée cette frontière, nous comptons de façon séquentielle : 5, 6, 7... Chez les animaux, ce seuil introduit de l'approximation. Certains peuvent encore reconnaître entre deux quantités laquelle est la plus grande, mais à condition que celles-ci soient suffisamment distinctes. Ils feront ainsi d'autant plus d'erreurs que le ratio entre deux quantités sera grand : distinguer 2 et 12 (ratio 1/6) est plus facile que 10 et 12 (ratio 5/6). De même, la distance facilite la reconnaissance : 2 et 12 plus distincts que 1 et 6, même avec un ratio identique. Enfin, la difficulté croît avec la magnitude, autrement dit la taille des quantités numériques présentées.

Rien de tout cela pour l'éléphant, qui semble aussi à l'aise avec 7 et 8 qu'avec 2 et 3. « Cela va à l'encontre de la théorie actuelle, et, si ce résultat est confirmé, cela suggère que l'éléphant pourrait avoir un mode de calcul différent des animaux déjà étudiés », souligne Aurore Avarguès-Weber, éthologue à l'université de Toulouse, qui a récemment étudié les capacités de dénombrement des abeilles. Je serais néanmoins prudente, car un seul animal a été testé. »

Authai, l'Einstein des éléphants ? « Dans une précédente étude, nous l'avions testé avec quatre autres et les résultats allaient déjà en ce sens, répond Naoko Irie. Alors cinq Einstein, je ne pense pas. » Psychologue spécialiste du dénombrement chez les bébés, Véronique Izard s'inquiète de son côté de la fiabilité statistique de l'étude. « Nous allons poursuivre avec davantage d'animaux et en dépassant le nombre 10 », annonce la chercheuse japonaise.

Autant de précautions nécessaires avant de pouvoir confirmer l'intuition de l'éthologue : « L'éléphant pourrait avoir une sorte de représentation symbolique de l'information numérique. » « L'éléphant d'Asie, corrige la Japonaise. Rien de tel n'a été montré chez son cousin d'Afrique, et les deux espèces ont divergé il y a aussi longtemps que nous et les singes. » ■

N. H.