



Un bacille assez vache

La paratuberculose bovine, épidémie mondiale et silencieuse, réduit la production laitière et reste difficile à traiter. **PAGE 2**



Foire aux prototypes Echanger des procédés, fabriquer des machines : à Rennes, une nouvelle forme de partage des savoirs a été expérimentée par les chercheurs. **PAGE 3**



Les cinq secrets de l'Amazonie Le Brésilien Antonio Donato Nobre lance un cri d'alarme sur la déforestation massive, qui a commencé à détraquer le climat de la région. Entretien. **PAGE 7**



Qui veut la peau du stéthoscope ?

De nouveaux échographes portatifs promettent de remplacer l'instrument fétiche du médecin. Dans cette guerre de l'image contre l'écoute, l'invention de Laennec conserve des défenseurs.

PAGES 4-5

EMILE LOREAU POUR « LE MONDE »



CARTE BLANCHE

Laurent Alexandre

Chirurgien urologue,
président de DNAVision
l.alexandre@dnavision.be
(PHOTO: MARC CHAUMEIL)

Les médecins dans la tempête numérique

D'ici à 2030, plus aucun diagnostic médical ne pourra être fait sans système expert. Il y aura un million de fois plus de données dans un dossier médical qu'aujourd'hui. Cette révolution est le fruit du développement parallèle de la génomique, des neurosciences et des objets connectés. L'analyse complète de la biologie d'une tumeur exige, par exemple, 100 millions de milliards d'opérations. De nombreux capteurs électroniques vont bientôt pouvoir monitorer notre santé : des objets connectés, comme les lentilles Google pour les diabétiques, vont ainsi produire des milliers puis des milliards d'informations chaque jour pour chaque patient. « Google X », le laboratoire secret, met au point un système de détection ultra-précoce des maladies par des nanoparticules qui vont aussi générer une quantité monstrueuse d'informations.

Comprendre les maladies du cerveau d'un patient supposera d'injecter des quantités phénoménales de données dans le dossier médical. Les médecins vont affronter une véritable « tempête numérique » : ils de-

ront interpréter des milliers de milliards d'informations quand ils ne gèrent aujourd'hui que quelques poignées de données. Même le Dr House serait incapable de traiter ce déluge de données. La profession peut-elle s'adapter à une mutation aussi brutale ?

La réalité est que, dès aujourd'hui, Watson, le système expert d'IBM, est capable d'analyser en quelques instants des centaines de milliers de travaux scientifiques pour comprendre une mutation cancéreuse là où il faudrait trente-huit ans au cancérologue en travaillant jour et nuit pour un seul patient. C'est plus que l'espérance de vie du patient, et même de l'oncologue. Puisqu'il est exclu que le médecin vérifie les milliers de milliards d'informations que la médecine va produire, nous allons assister à une mutation radicale et douloureuse du pouvoir médical. Les médecins signeront des ordonnances qu'ils n'auront pas conçues. Le risque est grand que le médecin soit l'infirmière de 2030 : subordonné à l'algorithme, comme l'infirmière l'est aujourd'hui au médecin.

Autre effet collatéral, l'éthique médicale ne sera plus le produit explicite du cerveau du médecin : elle sera

produite plus ou moins implicitement par le système expert. Le pouvoir médical et éthique sera aux mains des concepteurs de ces logiciels. La grande mission du Comité national d'éthique sera d'analyser l'éthique des logiciels. Ne soyons pas naïfs : aucun ne sera français ! Ces systèmes experts seront des monstres de puissance et d'intelligence. Chacun coûtera des milliards de dollars et s'auto-améliorera par l'analyse des millions de dossiers de patients qu'il monitorera.

Les leaders de l'économie numérique, les GAFAs (Google, Apple, Facebook, Amazon) ainsi qu'IBM et Microsoft seront sans doute les maîtres de cette nouvelle médecine. La France n'a aucune chance dans cette bataille. La loi Touraine est en train de verrouiller l'accès aux données médicales et de tuer dans l'œuf l'industrie française des algorithmes médicaux alors que Dassault Systèmes aurait pu la structurer. Les systèmes experts seront essentiellement made in USA, là où la constitution de cohortes de millions de patients pour les alimenter a déjà commencé. La marginalisation de la médecine française peut être spectaculaire. ■

La bactérie qui mine la filière laitière

MÉDECINE VÉTÉRINAIRE | De la même famille que la lèpre, la paratuberculose bovine dégrade la production lactée. Cette épidémie mondiale, silencieuse et méconnue des éleveurs, reste difficile à enrayer

RAPHAËLE MARUCHITCH

Bien connue des milieux vétérinaires et des éleveurs, la paratuberculose a été décrite pour la première fois à la fin du XIX^e siècle. Cette maladie spécifique aux ruminants est causée par une mycobactérie, de la même grande famille que celles responsables de la tuberculose humaine et bovine et de la lèpre. La paratuberculose est principalement problématique dans les élevages de vaches laitières. Incurable, elle provoque au stade clinique des diarrhées persistantes. L'animal doit

La vaccination ne peut être largement étendue car elle crée des interférences avec le dépistage de la tuberculose

alors être abattu et perd sa valeur bouchère. Un premier impact économique pour les éleveurs.

Mais ce n'est ni le seul ni le principal : lorsque la vache est déjà infectée mais ne présente pas encore de symptômes, la maladie fait déjà « baisser sa production lactée de 4 % à 20 % », explique Jeanne Brugère-Picoux, professeure émérite à l'École nationale vétérinaire d'Alfort (Val-de-Marne), auteure d'un supplément technique de *La Dépêche vétérinaire* sur le sujet. Concrètement, « la perte peut être estimée de 2 à 3 litres de lait par jour et par animal, avance Alain Joly, vétérinaire-conseil au sein du Groupement de défense sanitaire (GDS) de Bretagne. *Le manque à gagner est donc extrêmement important*. Jusqu'à près de 5 000 euros par élevage et par an, selon la taille de l'exploitation et la prévalence de la maladie, ont calculé les GDS du Grand Ouest.

Mais pour de nombreux éleveurs qui la sous-estiment, la paratuberculose passe inaperçue. D'évolution très lente, la maladie est chronique et systématiquement diagnostiquée trop tard. La vaccination est quant à elle

soumise à autorisation et ne peut être largement étendue, car elle crée des interférences avec le dépistage de la tuberculose. « Il n'est alors plus possible de faire la différence entre les deux maladies », précise Gaël Gounot, vétérinaire au sein d'un cabinet breton impliqué dans la filière laitière. Or, la tuberculose, transmissible à l'homme, impose de rester vigilant.

En résumé, on ne distingue que la partie émergée de l'iceberg, c'est-à-dire les vaches malades. Les animaux infectés qui ne présentent pas de signes cliniques en constituent la partie immergée. « C'est une maladie complexe, sournoise, dont il est difficile de se débarrasser », observe Philippe Pillons, directeur du GDS de la Mayenne. Aujourd'hui, la paratuberculose est présente sur tous les continents. « Partout, nous sommes confrontés à des difficultés pour la maîtriser et pour avoir une prévention efficace », précise Christine Fourichon, directrice de l'unité mixte de recherche (Institut national de recherche agronomique-Oniris) BioE-Par (Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale). « On a laissé s'installer et s'étendre la maladie », constate Jeanne Brugère-Picoux. Pourtant, des moyens peuvent être mis en œuvre pour l'enrayer.

C'est notamment ce que préconisent les plans de maîtrise chapeautés

par les GDS. Ils aident les éleveurs à appliquer des mesures de prévention comme la réduction des risques d'achat d'animaux infectés. Actuellement, au sein du GDS Mayenne, 150 élevages font partie d'un plan d'assainissement volontaire. « Nous avons toutefois l'intuition qu'il y a bien plus d'élevages touchés », reconnaît Philippe Pillons. Rien n'oblige les éleveurs à appliquer un plan, par ailleurs onéreux. « En apparence, lutter contre la maladie coûte plus cher que de ne rien faire ! Dans les conditions actuelles, la maîtrise n'est pas possible, affirme Gaël Gounot. Les éleveurs seraient plus réactifs si on abordait la problématique par la voie économique. » Sentiment partagé par le spécialiste outre-Atlantique de la paratuberculose, le professeur de microbiologie Michael T. Collins, qui dénonce la situation mondiale attentive et s'indigne que « rien ne soit fait pour arrêter la contamination ».

Toutefois, la recherche s'active sur le sujet. La maladie fait partie des préoccupations de l'INRA, qui a engagé plusieurs projets sur cette thématique. « A l'origine, nous avons été sollicités par les GDS et avons alors engagé un état des lieux des connaissances de la maladie, se souvient Christine Fourichon. De fil en aiguille, nous avons constaté que les plans de maîtrise à travers le monde étaient

coûteux et d'une efficacité modérée. C'est de là, par exemple, qu'est née l'idée du projet *Picsar* [Paratuberculosis Control in Cattle and Sheep]. » Ce contrôle de la paratuberculose chez les bovins et les moutons a pour objectif « d'observer si l'amélioration génétique des animaux, combinée à des mesures classiques de prévention, améliore la maîtrise de l'infection », détaille Christine Fourichon. « Notre finalité est d'aider les gestionnaires de la santé à prendre des décisions, à pouvoir évaluer les mesures à mettre en œuvre », explique Pauline Ezanno, chargée de recherche dans l'unité BioE-Par, qui travaille à la modélisation de la maladie.

Sur le terrain, des initiatives voient le jour pour tenter d'offrir des solutions plus simples aux éleveurs. Ainsi, au GDS Mayenne notamment, les éleveurs laitiers ont la possibilité de faire tester leur lait. Si un animal est infecté par la bactérie, il produit en effet des anticorps dont le taux peut être mesuré dans le lait. « L'idée est de fournir une indication aux éleveurs sur la situation de leur cheptel », indique Philippe Pillons. Simple à pratiquer, le test est un premier pas permettant de sensibiliser l'éleveur à la problématique. Une évolution indispensable, en attendant mieux, pour mobiliser et s'engager dans un contrôle de la maladie. ■



La paratuberculose peut coûter jusqu'à 5 000 euros par élevage et par an, selon la taille de l'exploitation. FANNY LEGROS

La décision de ne pas subir

Son premier cas était une génisse de 2 ans. Laurent Jamin, éleveur de vaches laitières à Châtillon-en-Vendelais (Ille-et-Vilaine), s'en souvient parfaitement. Il s'est aperçu que sa bête maigrissait à la fin de l'année 2007. « Nous avons alors testé les animaux et découvert que d'autres vaches étaient infectées », raconte-t-il. Laurent Jamin était récemment installé en groupement agricole d'exploitation en commun avec deux autres éleveurs, totalisant 115 vaches laitières et 80 génisses environ. Rapidement, la décision est prise de ne pas subir la situation.

Dans les six mois, l'éleveur entre dans un plan de maîtrise du Groupement de défense sanitaire (GDS) Bretagne, pour cinq ans. Mais malgré la prise en charge incluse d'une partie des analyses et des prélèvements effectués sur les animaux, « on ne s'y retrouve pas, commente l'éleveur. Nous avons dû abattre quatre ou cinq primipares en bonne santé par an, et le renouvellement coûte cher ». Depuis deux ans, il a tout de même obtenu une dérogation pour faire vacciner le troupeau. « Pour l'instant tout va bien, mais il nous faut du recul », reconnaît l'éleveur. ■

RA. M.

Lumière sur le Meccano moléculaire de nos cellules

A Paris pour un colloque consacré au trafic vésiculaire, les trois Nobel de médecine 2013 ont présenté les dernières avancées

FLORENCE ROSIER

C'est à de frénétiques trafics occultes que se livrent nos cellules, en toute impunité. Le 19 novembre, les spécialistes de ces flux effrénés de membranes et vésicules étaient réunis au Collège de France, à Paris, autour des trois Prix Nobel de médecine 2013 : Thomas Südhof, de l'université Stanford, Randy Schekman, de l'université de Berkeley, et James Rothman, de l'université Yale. Tous fédérés autour du trafic vésiculaire.

L'enjeu vous laisse de marbre ? Il est pourtant vital. Jugez : sans cesse, nos cellules expédient des protéines d'un endroit à l'autre, enveloppées dans de minuscules vésicules. Cette infime agitation est au cœur des processus de commu-

nication entre les cellules. C'est elle qui permet la sécrétion d'hormones comme l'insuline. Elle qui orchestre la libération des messagers chimiques qu'utilisent les neurones pour transmettre l'influx nerveux (les neuromédiateurs). Elle encore qui gouverne le relargage de messagers impliqués dans nos défenses immunitaires. Elle enfin qui assure l'élimination des déchets cellulaires.

« Les cellules sont bourrées d'organites qui naviguent de façon précise dans un milieu visqueux », raconte Alain Prochiantz, professeur au Collège de France. *Ceux-ci forment autant de compartiments bornés par des membranes biologiques : mitochondries, réticulum endoplasmique, appareil de Golgi, phagosomes... Toutes ces structures sont vivantes et, en permanence, el-*

les produisent, transportent et éliminent des molécules. »

Mais comment les bonnes protéines sont-elles libérées au bon moment et au bon endroit ? Produites dans le réticulum endoplasmique, elles circulent d'un compartiment à l'autre en empruntant de petites vésicules. Celles-ci bourgeonnent depuis la membrane d'un compartiment, puis voguent jusqu'à leur compartiment de destination : elles fusionnent alors avec sa membrane.

Mécanismes méconnus

Un grand nombre de maladies immunologiques, neurologiques ou endocrines sont dues aux dérèglements de cette machinerie si sophistiquée. « Toutes les thérapies destinées à traiter les maladies neuro-dégénératives ont échoué :

c'est parce que nous ne comprenons pas les mécanismes biologiques en jeu, souligne Thomas Südhof. Nos travaux sont une petite étape vers l'élucidation des processus de transmission du signal nerveux. »

« J'ai toujours été fasciné par la rapidité des mécanismes de libération des neurotransmetteurs », confie-t-il. Comment le message nerveux est-il transmis en quelques millisecondes ? C'est à cette question qu'il s'attache depuis trois décennies. Cette mécanique bien huilée repose sur trois jeux d'engrenages coordonnés. Le premier permet à des ions calcium d'arriver au bon endroit : tout près de la vésicule qui contient le neurotransmetteur, dans la terminaison nerveuse. Le second gouverne la fusion de cette vésicule avec la membrane plasmique. Le troisième dé-

clenche cette fusion par un afflux très rapide d'ions calcium : et le neurotransmetteur est libéré.

« La rapidité de ce processus tient à une astuce : le système est déjà prêt à réagir à l'arrivée des ions calcium. Un peu comme un dragster : à l'arrêt, le moteur tourne déjà à plein régime. Il suffit de relâcher le frein pour que la voiture soit lancée à pleine vitesse », résume Thierry Galli, directeur de recherche à l'Inserm (Institut Jacques Monod, université Paris-Diderot), qui organisait ce colloque.

Ce triple Nobel résulte de la convergence de trois approches. La première est celle du biochimiste et physicien James Rothman. Elle le conduira à montrer comment les vésicules livrent leur cargaison de protéines à la bonne adresse : elles portent des « clés spécifi-

ques », des protéines nommées SNARE, qui s'unissent en formant des « fermetures éclair ». La seconde approche sera celle de Randy Schekman : spécialiste de la levure, ce généticien découvrira trois familles de gènes gouvernant ce mode de transport. La troisième sera celle du neuroscientifique Thomas Südhof. « Ces trois voies ont convergé vers la découverte de mécanismes qui se sont révélés extrêmement conservés entre les espèces et dans toutes nos cellules », s'émerveille Thierry Galli.

Reste cette fascinante question : comment l'évolution a-t-elle pu forger un jeu de Meccano moléculaire aussi raffiné ? « Ces processus ont été mis en place lorsque sont apparues les premières cellules, puis ils se sont progressivement sophistiqués », indique Alain Prochiantz. ■

Le fOSSa, bazar techno-participatif

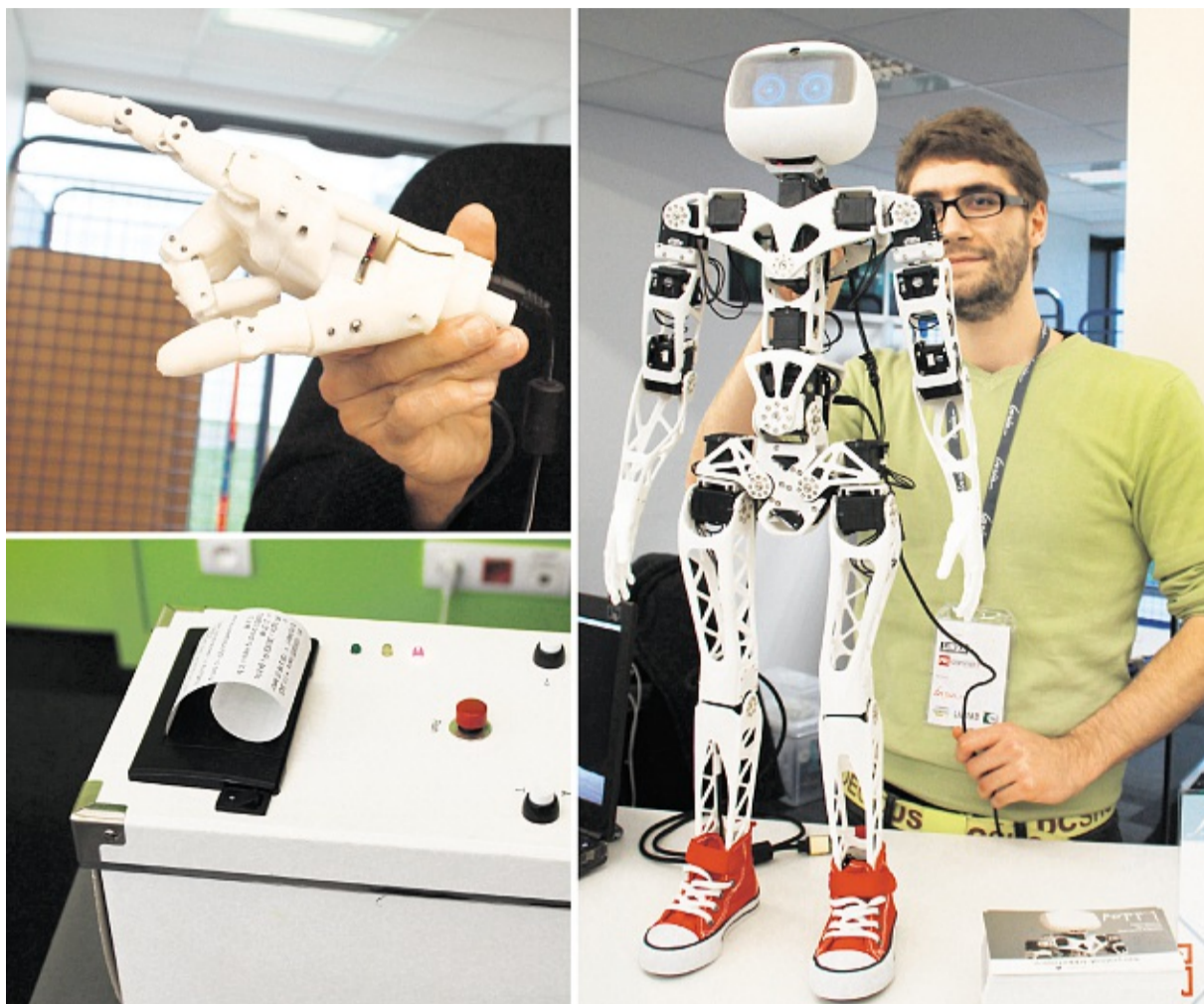
TECHNOLOGIE | A Rennes, procédés et matériels ont été échangés sur le mode du logiciel libre

DAVID LAROUSSERIE

« **L**e fossa est un animal, agile comme un félin qui vit à Madagascar », explique docement le chercheur Stéphane Ribas. Ce dernier est pourtant loin d'être un spécialiste de zoologie. Il est informaticien à Inria Grenoble et principal organisateur d'une conférence certes assez « sauvage », qu'il a baptisée fOSSa, pour Free Open Source Software for Academia (« Logiciel libre et open source pour l'académie »). « Il y a six ans, lorsque j'ai lancé cette idée, je voulais faire passer un message. Dans la recherche, nous pratiquons volontiers la collaboration, le partage et l'ouverture. Autant de qualités présentes dans les logiciels libres. Or nous étions un peu oubliés par ces communautés. Il fallait donner de la visibilité à notre activité, explique-t-il. Maintenant, c'est gagné. Les principes d'ouverture sont partout : dans le logiciel, l'art, la maison, l'agriculture, le journalisme... ! »

« Les principes d'ouverture sont partout »

STÉPHANE RIBAS
organisateur



A gauche, une prothèse de main réalisable avec une imprimante 3D (en haut) et un miniséquenceur de génome dans une boîte à chaussures (en bas). A droite, Poppy, un robot fait maison. C. LAFON/INRIA

fOSSa, qui s'est tenue du 19 au 21 novembre à Rennes, est un peu un grand bazar mêlant exposés techniques, démonstrations de matériel et débats. Il y est question d'architecture, de vie privée, de communication, d'économie, d'éducation... Le point commun est celui des quatre libertés, posées par le logiciel libre et qui s'appliquent aussi désormais au matériel. L'utilisateur peut exécuter, modifier, améliorer ou diffuser un programme (ou un plan) protégé par l'une des multiples licences libres. L'Organisation européenne de recherche nucléaire (CERN) en a même proposé une. Cela s'oppose aux modèles fermés et propriétaires qui ne peuvent être adaptés, voire améliorés, ni détournés.

Au-delà de la rigueur scientifique et technique, la politique n'est donc jamais loin. Un participant rappelait ainsi une citation d'Adrian Bowyer, à l'origine d'imprimantes 3D open source : « Le prolétariat doit reprendre la propriété de ses moyens de production. » En ces temps de robotisation à outrance, d'Internet des objets ou de villes intelligentes, le slogan

peut faire mouche. Et les chercheurs de fOSSa veulent y apporter leur pierre.

Une équipe d'Inria Rennes a ainsi présenté un outil pédagogique (Amiunique.org) pour sensibiliser aux traces laissées sur Internet. Les sites repèrent l'internaute par une signature quasi unique, basée sur la version de son navigateur, de son système d'exploitation, des extensions installées et des polices de caractères... Pour brouiller cette signature sans nuire à la navigation, les chercheurs développent aussi une solution, Blink, disponible à la fin de l'année pour les spécialistes.

Christian Grothoff, également à Inria Rennes, s'en prend, lui, au système financier. Avec des confrères, il a lancé le développement de Taler, un système de paiement garantissant l'anonymat des acheteurs tout en permettant aux autorités de garder la possibilité de taxer les ventes, contrairement à d'autres systèmes tels Bitcoin et autres dérivés. L'équipe, qui bénéficie des conseils du père des logiciels libres Richard Stallman, devrait rendre cette technologie disponible pour 2016.

La biologie aussi pourrait changer. Guillaume Collet, d'Inria Rennes, a montré comment « les contraintes techniques poussent à la créativité ». Avec des collègues, il a réalisé un assembleur de séquences génomiques avec le plus petit ordinateur du monde, le Raspberry Pi, aux caractéristiques également très ouvertes. En 2012, ils ont mis au point un algorithme très efficace pour le séquençage demandant beaucoup moins de mémoire. Pour en faire la promotion, l'équipe a mis sa machine dans une boîte à chaussures : elle retourne, dans les longues séquences génétiques, une suite de bases de l'ADN entrées par l'utilisateur et l'imprime sur un ticket de caisse sortant de la boîte.

Stéphane Ribas n'est pas en reste. Il a aussi apporté son propre matériel libre : un robot configurable à façon, dont les pièces peuvent être fabriquées avec une imprimante 3D. Poppy est issu de la thèse de Matthieu Lapeyre et commence à envahir le monde universitaire, voire des écoles. Il ne marche pas encore tout seul mais peut imiter n'importe quel geste. Les chercheurs peuvent tester

leurs modèles d'interactions homme-machine, robot-robot, ainsi que le langage, la vision...

Côté robotique, un autre projet fou était présent : Inmoov. Un robot à taille humaine, lui aussi entièrement réalisable « à la main » avec des imprimantes 3D. C'est un sculpteur, Gaël Langevin, qui a lancé ce projet il y a seulement deux ans. Une communauté s'est depuis rassemblée autour. Son modèle de main a même été perfectionné pour devenir une future prothèse médicale, Bionicohand.

« fOSSa est un laboratoire d'idées où les différentes approches se confrontent, se combinent dans l'espoir de faire émerger de nouveaux modèles pour créer de la valeur, qu'elle soit sociale, économique, culturelle... », résume Stéphane Ribas, qui, avec des collègues de l'Inria, travaille sur l'évolution des modèles de publication scientifique. « Le système actuel, en informatique, bloque parfois les collaborations et la redistribution de nos programmes. Nous devrions avoir un système de publication plus ouvert et collaboratif, imagine le chercheur. On devrait devenir éditeur nous-même. Il faut reprendre le pouvoir ! » ■

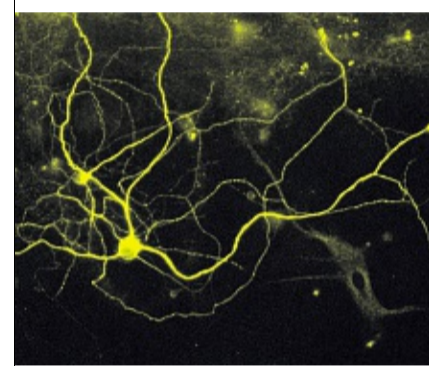
TÉLESCOPE

Physique Deux nouvelles particules au tableau de chasse

L'expérience internationale LHCb de l'organisation européenne de recherche nucléaire (CERN) a permis de découvrir deux nouvelles particules de la famille des baryons, cousines des protons ou des neutrons constituant les atomes. Bien que leur existence ait été prédite par la théorie, elles n'avaient jamais été observées. Ces deux baryons sont environ six fois plus lourds que les protons dont ils sont nés après les collisions dans l'accélérateur de particules du CERN. Alors que les protons sont constitués de trois quarks, dont deux identiques, ces baryons sont formés de trois quarks différents, baptisés *beauty*, *strange* et *down*. La découverte permet de tester la précision des théories d'interaction entre quarks, l'un des pans du modèle standard de la physique décrivant toutes les particules.

► Aaij et al., « Physical Review Letters », à paraître.

Neuroscience Mieux comprendre les neurones de la douleur



En reprogrammant des cellules cutanées (fibroblastes), des chercheurs américains de l'université Harvard ont réussi à obtenir des neurones nociceptifs, sensibles à plusieurs types de stimulations douloureuses, aiguës notamment. Les expériences ont été réalisées avec des cellules cutanées de souris mais également avec des fibroblastes humains, en utilisant cinq facteurs de transcription. Ce nouveau modèle d'étude devrait être utile pour mieux caractériser certaines neuropathies et hypersensibilités à la douleur.

(PHOTO : LIZ BUTTERMORE)

► Wainger et al., « Nature Neuroscience », 24 novembre.

7 %

C'est l'augmentation du nombre de tests positifs au VIH en France, entre 2011 et 2013, selon une étude publiée dans le *Bulletin épidémiologique hebdomadaire (BEH)* du 28 novembre. Après la publication de recommandations nationales de dépistage en 2011, le nombre total de tests réalisés a augmenté, puis il s'est rapidement stabilisé. L'année 2013, 5,2 millions de sérologies VIH ont ainsi été pratiquées, soit 80 pour 1 000 habitants. Parmi elles, 11 278 ont été confirmées positives, soit une hausse de 7 % par rapport à 2011, « ce qui pourrait correspondre à un dépistage plus ciblé auprès de populations particulièrement exposées », selon le BEH.

Archéologie Un Tibet conquis par l'homme grâce à l'orge

Pour s'installer durablement sur le Toit du monde, les hommes ont eu besoin de grains d'orge. Une équipe internationale a étudié des ossements d'animaux et des résidus végétaux retrouvés sur 53 sites du plateau tibétain, où une présence humaine ancienne était attestée. Elle conclut que si les premiers vestiges remontent à plus de 20 000 ans, l'installation permanente d'humains au-dessus de 3 000 mètres (et jusqu'à 4 700 mètres) n'a été rendue possible que par l'arrivée de nouvelles céréales, venues de l'Ouest et résistantes au froid, en particulier l'orge. C'était il y a environ 3 600 ans.

► Chen et al., « Science », 21 novembre.

Pour s'endormir, gare à la lumière bleue le soir

Les diodes électroluminescentes utilisées dans certains écrans perturbent l'horloge biologique

PASCALE SANTI

Utiliser des écrans avant de dormir n'est pas forcément bon pour tomber dans les bras de Morphée. « La lumière est le principal synchronisateur de l'horloge circadienne », a rappelé, jeudi 20 novembre, Claude Gronfier, chercheur en chronobiologie à l'Inserm (Bron, Rhône), lors du 29^e Congrès du sommeil à Lille. En particulier la lumière bleue des diodes électroluminescentes (LED), émise par les écrans de ordinateurs, téléviseurs, smartphones et autres tablettes, pour le rétroéclairage : elle active cent fois plus les récepteurs photosensibles non visuels de la rétine (cellules ganglionnaires) que la lumière blanche d'une lampe. La lumière solaire est celle qui compte le plus de bleu.

Notre organisme est soumis à un rythme biologique dont dépendent presque toutes les fonctions biologiques, dont le sommeil. Logée dans le cerveau, dans l'hypothalamus, cette horloge est resynchronisée chaque jour, principalement par la lumière captée par l'œil. Elle transmet l'information à un ensemble de structures, de tissus et d'organes, afin de permettre un bon éveil le jour et un bon sommeil la nuit.

« Si on s'expose à une lumière enrichie en bleu, cela provoque un retard de l'horloge, donc un retard à l'endormissement et le plus souvent une dette de sommeil », explique Claude Gronfier. « Deux cas nous inquiètent : le travail posté et ceux qui s'exposent tard à cette lumière bleue, principalement aux écrans, et les jeunes adultes et les ados », souligne le chercheur. Dans ces

deux cas, l'horloge est désynchronisée. « On voit des adolescents qui présentent certains des symptômes des travailleurs de nuit : sommeil perturbé, fatigue, dépression, troubles de la mémoire et de la cognition », pointe le neurobiologiste.

Jet lag social

Une enquête présentée le 21 novembre, menée auprès de 776 préadolescents (âge moyen : 12,4 ans) de quatre collèges de la région parisienne, par Sylvie Royant-Parola, présidente du Réseau Morphée, a montré que 10,6 % d'entre eux se réveillent pour jouer ou discuter en ligne la nuit. Un quart des 11-15 ans présentent un temps de sommeil trop court (moins de sept heures), souligne le professeur Damien Léger, chef du Centre du sommeil et de la vigilance à l'Hôtel

Dieu (Paris), dans *PLoS One*. « Les adolescents vont être exposés plus longtemps à la lumière à un moment où ils ne devraient pas l'être. On parle de jet lag social, qui a deux effets : l'heure du coucher plus tardive et un impact biologique, le blocage de la mélatonine », une hormone favorisant l'endormissement, constate le professeur Yvan Touitou, chronobiologiste et membre de l'Académie de médecine.

Une étude menée en 2012 par Mariana Figueiro, du Lighting Research Center (New York), publiée dans la revue *Applied Ergonomics*, a montré que l'utilisation prolongée de tablette à écran LED dans la pénombre perturbe la sécrétion de mélatonine. Dans un rapport de 2010, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail avait

déjà pointé les risques des écrans LED pour les enfants, dont l'œil filtre moins bien la lumière.

La liste des effets négatifs d'une dette de sommeil est longue : problèmes cardio-vasculaires, conséquences sur le système immunitaire, sur la concentration, le métabolisme, les résultats scolaires...

Le fait de traiter le retard de phase, en baissant l'exposition le soir et en l'augmentant le matin, peut toutefois inverser la tendance, a constaté Claude Gronfier sur une population proche de l'Arctique. « De la même façon qu'on parle d'hygiène de vie, il faut réfléchir à une hygiène de lumière », suggère-t-il. Outre les réflexes de bon sens, il est conseillé de réguler l'usage des écrans avant le coucher et de repérer si l'enfant a du mal à se lever le matin. ■

Stéthoscope

Il n'a plus le monopole du cœur

MÉDECINE

Près de deux siècles après son invention, le symbole absolu du médecin tend à être supplanté par l'échographe. Triomphe du progrès technique ? Mise à distance du corps du patient ? Les praticiens sont divisés

NATHANIEL HERZBERG

Fermez les yeux, retenez votre respiration et imaginez. Il est médecin, arbore le sourire de George Clooney, porte la blouse blanche. Et autour du cou... rien. Aucun tube en caoutchouc tombant depuis les oreilles. Ni dépassant ostensiblement de la poche. Maintenant respirez, car il va falloir s'y faire. Le stéthoscope, qui fêtera son 200^e anniversaire dans deux ans, ne se porte plus très bien. À écouter certains, il serait même condamné. Une affaire de temps, assurent-ils. Mais leur pronostic ne laisse pas place au doute : dans une génération, tout au plus, ce symbole absolu du médecin, qui à lui seul a permis de le distinguer des autres soignants en blouse blanche, aura disparu.

Le diagnostic, comme souvent, a été posé par les Américains. Coup sur coup, *Global Heart*, revue de la société mondiale de cardiologie, et le prestigieux *New England Journal of Medicine* ont publié des éditoriaux dressant l'oraison funèbre du célèbre instrument. « Aussi sûr que les cassettes ou les CD pour la musique », assuraient, dans *Global Heart*, les professeurs Jagat Narula et Bret Nelson, respectivement cardiologue et urgentiste au Mount Sinai Hospital de New York, les stéthoscopes sont promis à une mort certaine. Sur les forums, les médecins se sont déchirés, les uns jurant que jamais ils n'abandonneraient leur précieux assistant ; les autres déclarant leur flamme au nouveau roi.

Car c'est bien de cela qu'il s'agit. Le stéthoscope s'apprête à subir l'assaut d'un rival plus jeune, plus performant, plus fiable. Un concurrent qui, signe des temps, ressemble à un

smartphone, avec son couvercle rétractable et son écran. D'un geste, le médecin l'ouvre, applique sa sonde sur la poitrine ou le ventre du patient, et le voilà qui contemple les mouvements d'un cœur, les détails d'un poumon ou l'état d'une vessie. Apparu il y a cinq ans, cet échographe ultraportable a été expérimenté par quelques hôpitaux américains. Il est devenu courant dans les écoles de médecine outre-Atlantique. En Europe, le mouvement

En Europe, le mouvement reste encore timide. General Electric a vendu trois mille exemplaires de son Vscan, dont seulement deux cents en France

reste encore timide. Leader du segment, General Electric a vendu 3 000 exemplaires de son Vscan, essentiellement en Allemagne, en Italie, en Espagne et en Grande-Bretagne. La France arrive derrière, avec 200 appareils. « Mais c'est un nouveau marché, et il se développe très bien », assure-t-on chez le fabricant américain.

Car, après les gynécologues-obstétriciens et les cardiologues – les premiers à avoir fait sortir l'échographie des cabinets de radiologie –, le mouvement touche d'autres spécialités. Urologues, pneumologues, internistes et surtout urgentistes et réanimateurs découvrent le potentiel des instruments compacts. « Ça fait huit mois que je suis équipé et ça a bouleversé ma pratique », assure Jean-Luc Dinet, ur-

gentiste à Sens (Yonne) et vice-président de SOS Médecins. *C'est une aide à la décision considérable. Une semaine après avoir eu l'appareil, j'ai vu une jeune fille fatiguée avec une prise de poids importante. J'ai palpé la thyroïde, puis j'ai fait une échographie. Il y avait des nodules. Trois jours plus tard, elle faisait une scintigraphie, la semaine suivante, elle était opérée. Auparavant, j'aurais fait faire un bilan général, lui aurais dit de consulter son généraliste... Combien de temps aurait-on perdu ?*

Gérer le temps. Détecter l'urgence et orienter correctement les patients. Jean-Luc Dinet poursuit : « Dans les pathologies pulmonaires, nous étions largement démunis. Une toux et une fièvre : on pouvait donner des antibiotiques, envoyer faire une radio... Et ça nous échappait. Là, on pose un diagnostic. C'est encore plus vrai avec les personnes âgées. On vous appelle un vendredi à 18 heures, une patiente a des grosses jambes. Pas de phlébologie ouvert jusqu'à lundi. Faut-il l'envoyer aux urgences ? Si c'est une phlébite, oui. Sinon, on lui fait subir un déplacement, des heures d'attente et des examens pour rien. Et on encombre l'hôpital. Désormais, j'ai la réponse. »

« Au début, ça nous a pris un peu de temps, précise le docteur Xavier Bobbia, médecin aux urgences du centre hospitalier universitaire de Nîmes. Mais maintenant, pour répondre aux questions simples que nous nous posons, c'est deux minutes pour un examen. Et le diagnostic est certain. »

En tout cas, très probable. Dans une étude conduite aux Etats-Unis et publiée dans *l'American Journal of Cardiology*, des étudiants de première année de médecine confrontés à soixante et un malades ont identifié 75 % des pathologies cardiaques présentes au moyen d'un petit échographe. Munis de leur seul stéthoscope, des cardiologues diplômés n'en avaient retrouvé que 49 %. Une autre étude conduite sur le foie a abouti à des résultats analogues.

La messe est-elle dite ? Va-t-on vraiment voir disparaître l'instrument inventé par Re-

né-Théophile-Hyacinthe Laennec, en 1816, après avoir observé deux enfants jouant dans la cour du Louvre ? Cessera-t-on d'enseigner cette incroyable séméiologie qui épuise les étudiants mais ravit les poètes ? Le « sibilant », semblable à « un ballon que l'on dégonfle en pinçant l'orifice », typique de l'asthme ; le « ronchi », un « sibilant grave, comme quand on souffle dans le goulot d'une bouteille », témoin d'un encombrement bronchique ou d'une pneumopathie infectieuse ; le « crépissant » et ses « bruits de sel dans le feu ou de pas dans la neige », signe d'une infection ou d'un œdème pulmonaire ; à ne pas confondre avec le « sous-crépissant », caractéristique de mucus dans les bronches, plus proche du « mais qu'on fait éclater ». Et par quoi remplacera-t-on ces bizutages de carabins, qui voulaient que l'on bouchât avec du coton les embouts du stéthoscope du dernier arrivé avant de lui demander de détecter un bruit suspect ?

« C'est sûrement le sens de l'histoire, admet Nicolas Danchin, professeur de cardiologie à l'Hôpital européen Georges-Pompidou. Le clystère a disparu, le stéthoscope disparaîtra peut-être un jour. Dans un service comme le nôtre, on l'utilise de moins en moins. Mais il nous permet de redresser certains diagnostics. Un rétrécissement aortique, par exemple. Vous le croyez très sévère à l'échographie, mais au stéthoscope, si vous entendez encore le second bruit du cœur, vous pouvez affirmer qu'il n'est pas si serré que ça. »

Au service de pneumologie du Centre hospitalier intercommunal de Créteil, l'échographie est devenue « un outil de travail indispensable », insiste le professeur Bruno Housset. Tous les internes qui passent dans le service sont formés à son utilisation par le docteur Gilles Mangiapan. Ce dernier met pourtant quelques bémols à l'enthousiasme de son patron. « C'est vrai, dans toutes les pathologies de la plèvre, pleurésie [épanchement liquide], pneumothorax [épanchement d'air], l'échographie a supplanté le stéthoscope, explique-t-il. Mais, devant une pneumonie, les images



« Le rôle de l'examen clinique s'érode »

Bret Nelson est urgentiste et professeur à l'hôpital Mount Sinai de New York. Dans la revue américaine *Global Heart*, il a cosigné un texte annonçant la mort du stéthoscope, en décembre 2013.

Comment a été reçu votre éditorial dans « Global Heart » ?

De façon disons... mitigée. Ceux qui utilisent déjà l'échographie mobile nous ont appuyés. D'autres, amoureux de leur stéthoscope, résistent à ce changement. Et ils trouvent l'appui d'une troisième catégorie, composée en grande partie de radiologues et de cardiologues, inquiète de voir une technologie qu'ils ont mis des années à apprendre, se retrouver dans les mains de tous. Mais, à la fin du XIX^e siècle, quand le stéthoscope s'est vraiment démocratisé, les spécialistes de l'époque ont réagi de la même manière.

A l'Icahn School of Medicine de l'hôpital Mount Sinai, tous

les étudiants sont-ils formés à l'échographie ?

Oui. Comme à l'université de Californie à Irvine, à l'université de Caroline du Sud, à l'université de l'Ohio et encore dans quelques autres... C'est utilisé comme une méthode de visualisation pour le cours d'anatomie en première année, mais aussi pour l'apprentissage de l'examen clinique en première et deuxième année, au même titre que le stéthoscope. Beaucoup d'étudiants trouvent l'échographie plus pratique, plus précise, plus fiable.

Ne risque-t-on pas, avec ce nouveau dispositif, d'éloigner encore un peu le patient du médecin ?

Je pense exactement le contraire. L'imagerie et les analyses, qui se déroulent hors du cabinet médical, ont eu cet effet. Parce qu'elles étaient plus fiables que la simple auscultation, elles ont effectivement contribué à éroder, depuis trente ou quarante ans, le rôle de l'examen clinique.

L'échographie peut au contraire rapprocher le malade et le praticien. Ensemble, ils vont observer les images, en apprécier les résultats, en discuter les conséquences. Et l'examen prend d'autant plus de valeur qu'il est pratiqué par celui-là même qui connaît le patient et son histoire.

C'est aussi un symbole que vous proposez de faire disparaître...

Je me souviens qu'autrefois, ici, aux Etats-Unis, un des symboles du médecin était le miroir circulaire qu'il accrochait sur son front pour regarder la gorge. Il a disparu. En Grande-Bretagne, les médecins ne portent plus de blouse blanche par crainte qu'elles transportent les infections. Un autre symbole qui tombe. Dans *Star Trek*, le docteur McCoy nous a préparés depuis les années 1960 à voir un médecin agiter une baguette au-dessus d'un patient : l'échographie coïncide parfaitement avec cette image. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR N. H.



Au Musée de la médecine, à Paris, le stéthoscope moderne, à côté des prototypes inventés par Laennec, dont un cahier roulé en cylindre.

EMILE LOREAUX POUR « LE MONDE »

Pionnier de l'imagerie nucléaire, médecin et philosophe, Henri Atlan ajoute : « On ne peut pas être technophobe. La technologie a fait faire des progrès considérables à la médecine. On soigne mieux, beaucoup mieux aujourd'hui qu'hier. Mais ces techniques, qui montrent tout, montrent parfois trop. On croit que quelque chose est pathologique alors que cela relève juste de la variation entre individus. » Ce qu'André Grimaldi, ancien chef du service de diabétologie à la Pitié-Salpêtrière, pourfendeur de l'hôpital-entreprise et de la « médecine industrielle », dit avec plus de virulence : « La puissance de la médecine n'est pas seulement coûteuse, elle est potentiellement dangereuse. La multiplication des examens peut facilement amener dans l'errance. Faites un scanner du pancréas à toute la population et vous trouverez de nombreuses boules suspectes. Mais est-ce un cancer ? Jusqu'où aller pour le vérifier ? Ne finit-on pas par créer artificiellement des malades ? La médecine, ce n'est pas ça. C'est une démarche, faite d'hypothèses et de déductions, et surtout un colloque singulier, un échange avec une personne en face de vous. »

Si ce n'est que l'histoire du progrès médical est aussi l'histoire de la mise à distance du patient, rappelle Céline Lefève. Et la maître de conférences en philosophie de la médecine à

« Une nouvelle technique s'impose quand l'ancienne est approximative, douloureuse ou dangereuse. Là, rien de tout cela »

MARTIN WINCKLER
médecin généraliste

l'université Paris-Diderot de citer Michel Foucault (*Message ou bruit ?*, 1966) : « Dans sa pratique, le médecin a affaire non pas à un malade, mais pas non plus à quelqu'un qui souffre, et surtout pas, Dieu merci, à un "être humain". Il n'a affaire ni au corps, ni à l'âme, ni aux deux à la fois, ni à leur mélange. Il a affaire à du bruit. A travers ce bruit, il doit entendre les éléments d'un message. » A ce titre, l'échographe s'inscrit pour M^{me} Lefève « dans la continuité du stéthoscope, pas en rupture ». Tout l'enjeu tiendra dans son utilisation. Ce que Jacques Lucas, vice-président de l'ordre des médecins, cardiologue et chargé des nouvelles technologies, admet aussi : « L'image fait courir le risque d'une mise à distance du malade. Mais elle peut être au contraire l'occasion d'un rapprochement. On peut expliquer une image à un patient, on ne pouvait pas lui faire écouter le stéthoscope. Encore faut-il former le médecin dans ce sens. »

Formation. Le grand mot, ou plutôt le grand manque. Pour Jacques Lucas, « il est certain que d'ici quelques années la formation initiale des généralistes inclura l'usage de l'échographie en premier recours ». En attendant, elle reste réservée à quelques enseignements de spécialités : radiologie, cardiologie, gynécologie... Et aux urgentistes des centres hospitalo-universitaires les plus en pointe, comme Amiens ou Nîmes. « Si l'on règle cette question, on aura effacé l'un des deux principaux obstacles à un remplacement du stéthoscope par l'échographie », assure le docteur Xavier Bobbia, chargé de ces enseignements à Nîmes. Le second ? « Le prix », dit-il avec un sourire. Aujourd'hui, il faut compter entre 7 000 et 10 000 euros pour acquérir un échographe ultraportable. Cent fois le coût d'un stéthoscope.

Ce qui fait sourire Martin Winckler : « Les fabricants peuvent bien dire que cet appareil sera parfait pour le médecin de campagne indien éloigné de tout centre d'échographie. Mais comment va-t-il le payer ? Une nouvelle technique s'impose quand l'ancienne est approximative, douloureuse ou dangereuse. Là, rien de tout cela. Et la force du stéthoscope, c'est sa simplicité. » Il réfléchit : « Le livre va-t-il disparaître au profit de l'iPad ? Je n'y crois pas. Là, c'est pareil. N'enterrons pas trop vite le stéthoscope, il va s'accrocher un moment. » Foi d'écrivain et de médecin. ■

ne sont pas spécifiques, alors que le foyer crépitant, vous l'entendez tout de suite. »

Mais c'est encore une autre mise en garde que cet adepte de la première heure tient à émettre. De fond, celle-là : « L'échographe doit venir en complément, enrichir l'examen. Depuis Laennec, l'examen clinique c'était palpation-percussion-auscultation, ça doit devenir palpation-percussion-auscultation-vision.

Vous pouvez rater un asthme parce que vous n'écoutez pas le patient. Ou laisser passer une

tumeur parce que vous ne l'avez pas palpé. »

Ne pas se priver d'une technique qui « s'est nourrie de deux cents ans de pratique médicale ». Et surtout, préserver « la richesse de l'examen ». Médecin généraliste et écrivain, Martin Winckler invite lui aussi à la prudence. « Un malade ça se regarde, ça s'écoute, ça se touche. Comment il se tient. Comment il marche. C'est une personne dans son intégralité que vous examinez. Dans une relation directe. C'est parce qu'il nous rapproche en réalité du

patient, parce qu'il est une projection de notre oreille, que le stéthoscope est si précieux. » Un peu fétichiste, Martin Winckler ? Comme tous les autres, il se souvient de son premier stéthoscope, celui que son père pneumologue lui avait donné ; puis du second, « avec un tube rouge, pour faire rigoler les enfants ». Il l'a conservé jusqu'à aujourd'hui. « Mais, honnêtement, je ne suis pas attaché aux symboles. Mon souci, c'est que la technologie ne nous éloigne pas du malade. »

Inspiré par un jeu d'enfants, Laennec fonde la médecine moderne

Pour inventer, il suffit de regarder là où il faut. Et si possible hors de son champ de compétence. L'invention du stéthoscope par René Laennec illustre parfaitement ce principe. Un jour de 1816, alors qu'il traverse la cour du Louvre, le médecin observe deux enfants jouant autour d'une poutre. L'un tapote l'extrémité avec une épingle ; le second, l'oreille collée à l'autre bout, l'écoute distinctement. Quelque temps plus tard, consulté par « une jeune personne qui présentait des symptômes généraux de maladie du cœur, et chez laquelle l'application de la main et la percussion donnaient peu de résultat à raison de l'embonpoint », Laennec se souvient des deux enfants. Il saisit un cahier, l'enroule et pose le cylindre ainsi formé sur la poitrine de la patiente. « Je fus aussi surpris que satisfait d'entendre les battements du cœur d'une manière beaucoup plus nette et plus distincte que je ne l'avais fait par l'application immédiate de l'oreille. » Le stéthoscope était né.

L'année suivante, Laennec développait sa technique, passait en revue divers matériaux. Le 23 février 1818, il

présentait son invention à l'Académie des sciences : un cylindre de bois de 30 cm sur 3 cm, avec un canal central de 6 mm et une forme d'entonnoir évidé du côté du patient. Avec le temps, il y ajoutera un obturateur pour adapter son instrument : cylindrique pour écouter la voix et le cœur, en forme d'entonnoir pour les poumons. Quant au nom, c'est un de ses élèves qui le trouve, à partir des mots grecs *stethos* (poitrine) et *scopio* (explorer).

Oreille affûtée

En 1819 paraît la première édition de son grand œuvre : *L'Auscultation médiate ou Traité du diagnostic des maladies des poumons et du cœur, fondé principalement sur ce nouveau moyen d'exploration*. Près d'un millier de pages de classification et de méthode d'exploration des pathologies pulmonaires, respiratoires et vocales. Pour en arriver là, Laennec a multiplié les auscultations mais aussi les dissections de cadavres. Convaincu que toute maladie a une cause organique et que chaque bruit anormal provient d'une lésion, il s'attache à établir les correspondances. Flûtiste confirmé, Laennec met à pro-

fit son oreille affûtée pour des descriptions d'une rare précision. Ainsi raconte-t-il cette auscultation d'une femme présentant « quelques signes de phtisie pulmonaire ». Écoulant la carotide droite, il entend « au lieu du bruit de soufflet, le son d'un instrument de musique exécutant un chant assez monotone (...). Je crus d'abord que l'on faisait de la musique dans l'appartement situé au-dessous. Je prêtai l'oreille attentivement ; je posai le stéthoscope sur d'autres points : je n'entendis rien. Après m'être assuré que le son se passait dans l'artère, j'étudiai le chant : il roulait sur trois notes formant à peu près un intervalle d'une tierce majeure ; la note la plus aiguë était fautive et un peu trop basse, mais pas assez pour pouvoir être marquée d'un bémol. » Sur le manuscrit, il inscrit même une portée où il relève notes et rythmes.

Il ne se contente toutefois pas de puiser dans son expérience de musicien. Un peu plus loin, il évoque un sifflement semblable à « la voix d'un ventriloque ou à celle d'un ramoneur entendue de loin, et sans qu'on puisse distinguer les mots, à raison de l'étroitesse du tuyau de la cheminée ». Cette

nouvelle méthode, ce nouveau vocabulaire, contribuent à la fondation de la médecine moderne. Le médecin peut désormais caractériser une lésion sans la contribution du patient. Le malade cède la place devant la maladie.

L'accueil est enthousiaste, à quelques exceptions près, dont François Broussais. Breton comme Laennec, aussi républicain et athée que Laennec est catholique et royaliste, Broussais, convaincu que le siège de la maladie est « l'irritation », raille « l'homme au cornet ». Sauf que, en quelques années, l'œuvre de Laennec triomphe. Le traité est traduit dans plusieurs langues.

Quant au stéthoscope, il ne cessera d'évoluer. Il devient évasé en 1828, flexible en 1832, biauriculaire en 1870... Autant d'innovations que le médecin, devenu professeur au Collège de France, ne verra jamais. En 1826, après avoir découvert également le mélanome et la cirrhose, il meurt de la maladie qu'il a toute sa vie combattu : la tuberculose. La petite histoire raconte qu'il l'a contractée lors d'une dissection et que c'est son cousin Meriadec qui l'a diagnostiquée. Avec son propre stéthoscope. ■

N. H.

Ciel, des femmes !

LE LIVRE

Yaël Nazé rappelle l'apport décisif, pour l'astronomie, de nombreuses scientifiques restées dans l'ombre

NATHANIEL HERZBERG

Pouvez-vous citer les noms de cinq femmes scientifiques ? Marie Curie, d'accord, et puis ? C'est par cette simple question et par la conviction qu'« il y a fort à parier que vous abandonneriez rapidement » ce petit jeu que Yaël Nazé ouvre *L'Astronomie au féminin*. Avec ce nouveau livre, l'astrophysicienne belge n'a pas « cédé à un féminisme enragé ». Elle entend simplement rappeler « l'apport décisif » des femmes pour la science du ciel.

L'affaire est ancienne. Déjà, la Babylonienne En-Hedu-Ana (XXIV^e ou XXIII^e siècle avant J.-C.), fille de Sargon I^{er} et grande prêtresse de Nanna, le dieu-lune, supervise l'activité des temples, « à l'époque des maisons du savoir où l'on observe étoiles et planètes », rappelle Yaël Nazé. L'Égypte ancienne puis la Grèce antique tiennent elles aussi leurs savantes. Elles s'appellent Aganike (XIX^e siècle av. J.-C.), Aglonike (5^e siècle av. J.-C.) ou Hypatie (355 ou 370-415), sont filles de roi ou de philosophe, et payent souvent cher leur soif de connaissance. Hypatie finira démembrée devant la croix qu'elle aurait refusé d'embrasser.

Quand elles ne souffrent pas le martyr, elles œuvrent dans l'ombre. Qui sait que le grand Tycho Brahe (1546-1601), l'« étoile du Danemark », mentor de Kepler, cache une étoile double ? Son fameux catalogue de positions planétaires, il l'a construit avec sa sœur Sophie (1559-1643), aussi adroite dans le relevé des astres que dans la science des jardins. Fille et sœur d'astronome, Caroline Herschel (1750-1848) serait sans doute elle aussi demeurée inconnue si en 1786, en l'absence de son frère, elle n'avait déniché sa première comète. Une découverte ? Par une femme ? L'Académie s'émeut et l'événement fait grand bruit.

Encore Caroline Herschel a-t-elle pu profiter du télescope familial. Car les femmes sont souvent écartées des instruments. A l'observatoire du mont Palomar, en Californie, il faudra attendre 1965 et l'arrivée de Vera Rubin pour voir s'introduire la mixité. D'autres y trouvent au contraire leur compte. A Harvard, Edward Charles Pickering (1846-1919) lève une petite armée féminine pour réaliser son catalogue de 225 000 étoiles. « Du personnel attentif au détail, patient, ne cherchant pas d'avancement, ne rechignant pas au travail routinier – et surtout bon marché », insiste Yaël Nazé. Du « harem de Pickering » émergeront les noms de Williamina Fleming, Antonia Maury et surtout Annie Cannon. Cette dernière, plusieurs fois primée, devra attendre 1938 pour obtenir un poste d'astronome, à 75 ans.

Les temps ont quelque peu changé. La Française Catherine Césarsky a même présidé l'Union astronomique internationale entre 2006 et 2009. Les femmes ne constituent toutefois que 16 % des membres de l'association. Yaël Nazé dresse cependant une liste impressionnante de leurs découvertes, des usines stellaires à la matière noire. Sans compter les pulsars. C'est une étudiante nommée Jocelyn Bell qui, la première, identifie ces phares de l'espace, en 1967, passant outre le scepticisme de son patron, Antony Hewish. En 1974, celui-ci obtiendra pourtant – seul – le prix Nobel de physique. ■

Yaël Nazé, *L'Astronomie au féminin*, CNRS Editions, 192 p., 20 €.

Agenda

Conférence Ebola, faut-il avoir peur ?

Patrick Berche, professeur de microbiologie et directeur général de l'Institut Pasteur de Lille, dressera un état des lieux des connaissances sur le virus Ebola.

Mercredi 3 décembre à 18 heures, Institut Pasteur de Lille. Inscriptions en ligne : www.pasteur-lille.fr.

Les rats comprennent-ils le japonais ?



IMPROBABLOGIE

Pierre Barthélémy

Journaliste et blogueur
Passeurdesciences.blog.lemonde.fr

(PHOTO: MARC CHAUMEIL)

Sans ouvrir une énième fois le débat de l'expérimentation animale, il faut bien reconnaître que la vie des souris et des rats de laboratoire n'est pas de tout repos. Mettez-vous à leur place. Cer-

tains scientifiques vous gavent de mais génétiquement modifié pour voir s'il va vous surgir un cancer ou une cinquième patte, d'autres vous font pousser une oreille humaine sur le dos, une troisième catégorie teste sur vous toutes sortes de molécules (candidats médicaments ou poisons, c'est selon) et il en est même qui trifouillent votre ADN pour allumer ou éteindre un gène, voire pour vous transformer en rongeur fluorescent. Estimez-vous heureux si vous ne croisez pas la route d'une blouse blanche désirant vous couper la tête, non pas pour que vous trouviez « la Voie » chère à Lao Tseu mais pour savoir combien de secondes l'encéphale survit à une décapitation...

Et puis voilà qu'un jour vous rencontrez des chercheurs qui, enfin, s'intéressent plus à votre cerveau qu'à votre corps et qui vous parlent. Ou plutôt qui vous font écouter des phrases enregistrées pour voir si vous êtes capable de distinguer deux langues humaines, le japonais et le néerlandais, à leur simple mélodie. Comme on récompensera vos bons résultats avec de la nourriture, on vous a juste mis à la diète pour

aiguiser votre appétit. Quatre groupes de rats sont constitués. Le premier travaille sur des phrases où les phonèmes ont été simplifiés : toutes les voyelles sont des « a », toutes les consonnes fricatives des « s », les explosives des « t », les liquides des « l », etc. Pendant vingt jours, on vous entraîne en vous passant seize phrases en néerlandais et en japonais. Le groupe a été divisé en deux et, si vous avez pour mission de reconnaître la langue de Kawabata, vous devez appuyer sur un levier quand vous croyez entendre du japonais. En cas de réussite, vous recevez de la nourriture, sinon rien (même pas une décharge électrique). Après cet échauffement, l'expérience commence : on vous diffuse quatre phrases que vous n'avez jamais entendues, pour savoir si vous êtes capable d'extrapoler les résultats de votre éducation.

Les trois autres groupes participent à des variantes de cette expérience. L'un écoute les mêmes bandes... mais passées à l'envers ! L'autre travaille sur des phrases véritables, non simplifiées, prononcées par un seul locuteur, tandis que le dernier est testé

avec plusieurs, ce qui complexifie la tâche puisque chaque personne a son élocution propre, son rythme, son accent, etc.

Il s'agit bien sûr d'une expérience réelle, publiée en 2005 par le *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*. Et l'on peut difficilement ne pas trouver loufoque de faire écouter du japonais ou du néerlandais à l'envers à des rats. C'est là le principal charme de la science improbable, faire pouffer... puis penser. Car les résultats de ce test sont étonnants : de la même manière que les bébés humains repèrent vite leur langue maternelle alors même qu'ils n'en comprennent pas encore le sens, les rongeurs ont été capables, grâce à leur entraînement, de distinguer les deux langues qui leur étaient soumises. L'étude précise d'ailleurs que là où les rats ont échoué (les phrases diffusées à l'envers), les petits *Homo sapiens* échouent aussi. D'où l'idée, profonde, que notre faculté à nous appuyer sur la mélodie des mots pour traiter la bouillie de sons que constitue le langage est directement issue de la capacité des mammifères à analyser les signaux acoustiques. Merci les rats. ■



NOAH FRAM-SCHWARTZ GREENWICH

Elle vous saute aux yeux

Ce regard énigmatique appartient à une araignée sauteuse, de l'espèce *Phidippus audax*. Il a été saisi par l'objectif d'un étudiant du Connecticut, Noah Fram-Schwartz, et lui a valu la troisième place du concours de microphotographie « Small World » organisé par Nikon, pour sa pre-

mière participation. « *Je rêvais de concourir depuis l'âge de 15 ans* », raconte le jeune homme, pour qui « il s'agit d'une des images les plus détaillées des yeux d'une araignée sauteuse jamais prises ». Il l'a obtenue par le procédé « hyper focus » consistant à superposer plusieurs clichés. ■

AFFAIRE DE LOGIQUE

Les grilles tactiles

Un industriel a fabriqué de petites grilles carrées tactiles de tailles différentes (de 2×2 à 5×5) où il suffit de poser le doigt sur une case pour changer la couleur (blanche ou noire) de la case touchée mais aussi de toutes les cases qui lui sont adjacentes par un côté. Au départ, toutes les cases sont blanches. Alice voudrait rendre noire une des cases, et une seulement. Quelles sont les cases pour lesquelles c'est possible dans chaque taille de grille (2, 3, 4 ou 5) ?

SOLUTION DU N° 889

Il y a deux nombres de huit chiffres autoréductibles. Il s'agit de 12 040 210 et de 24 120 020.

On part de N qui s'écrit *ab cde fgh* et on procède comme suit :

h, reste de la division par 2, ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1.

g, reste de la division par 3, ne peut prendre que les valeurs 0, 1 ou 2.

On essaie d'exprimer tous les autres chiffres en fonction de *g* et *h* :

• *f*, reste de la division par 4, est le reste de $10g + h$, donc de $2g + h$ dans cette division.

• *e*, reste de la division par 5, est égal à *h*.

• *d*, reste de la division par 6, est égal au reste de $3h - 2g$, donc de $3h + 4g$ dans cette division par 6.

• *b*, reste de la division par 8, est égal au reste de $2g + 5h$ dans cette division par 8

• *a* étant le reste de la division par 9, la somme des autres chiffres est divisible par 9.

Ainsi, $b + c + d + e + f + g + h$ est un multiple de 9, ce qui impose la valeur de *c* (et élimine quelques cas).

• Or, le reste *c* de la division par 7 est aussi le reste de $h + 3g + 2f + 6e + 4d + 5c + b + 3a$, ce qui s'écrit encore que $h + 3g + 2f + 6e + 4d + 4c + b + 3a$ est un multiple de 7.

Cela impose la valeur du reste de $3a$ dans la division par 7, et donne la valeur de *a* quand elle existe.

On vérifie que cette valeur est compatible avec le reste de la division par 3.

On applique ces résultats aux 6 cas correspondant au couple (*g*, *h*).

<i>h</i>	<i>g</i>	<i>f</i>	<i>e</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>3a</i>	<i>a</i>
0	0	0	0	0	0	0	0	exclu
0	1	2	0	4	2	0	3, 10, 17 ou 24	1 (<i>a</i> = 8 incompatible avec <i>g</i> = 1)
0	2	0	0	2	4	1	6, 13 ou 20	2
1	0	1	1	3	5	7	exclu	
1	1	3	1	1	7	4	6, 13 ou 20	2 incompatible avec <i>g</i> = 1
1	2	1	1	5	1	7	exclu	

ÉLISABETH BUSSER ET GILLES COHEN © POLE 2014

www.affairede logique.com

N° 890

Le Prix Tangente du livre à Jean-Paul Delahaye

Les Trophées Tangente 2014 ont été remis mercredi 19 novembre au Palais du Luxembourg. Des œuvres d'art mathématiques ont récompensé les lauréats des trois prix décernés chaque année par le magazine *Tangente* : le *Prix Bernard-Novelli*, concours de projets informatiques de lycéens autour du jeu et des maths, remporté par Mathieu Roget, un brillant élève de 16 ans, le *Prix Tangente du meilleur article*, remporté par un enseignant de Saint-Quentin, Fabien Aoustin, et le *Prix Tangente du livre*, prix littéraire attendu chaque année par les amateurs de culture mathématique. Six ouvrages avaient été « nommés » :

- *17 équations qui ont changé le monde*, de Ian Stewart, paru chez Robert Laffont ;
- *Surprenantes images des mathématiques*, de Konrad Polthier et Georg Glaeser, paru chez Belin ;
- *Cool Maths*, de Katie Howell et Tracy Young, paru chez Fleurus ;
- *Donc, d'après...*, de Philippe Colliard, paru chez Mathemagique.com ;
- *L'affaire Olympia*, de Mickaël Launay, paru aux Éditions Le Pommier ;
- *Inventions mathématiques*, de Jean-Paul Delahaye, paru chez Belin.

C'est ce dernier titre qui a remporté le suffrage du jury, un livre qui, au travers de chapitres indépendants aux titres évocateurs, montre que les mathématiques sont étonnamment riches, vivantes, toujours en éveil ; les idées jaillissent, des questions sont résolues, d'autres naissent... L'auteur apporte en permanence sa contribution personnelle à des sujets parfois anciens, et propose, avec clarté et enthousiasme, des prolongements vers des mathématiques très profondes. Les recherches conduites avec l'aide de l'ordinateur sont omniprésentes, ce qui est normal quand on connaît l'auteur, professeur d'informatique à l'université Lille-1 de 1988 à 2013, vulgarisateur hors pair par ses livres et par la rubrique « Logique et Calcul » qu'il assure dans *Pour la Science* depuis 1991.

Informations sur : <http://tropheestangente.com>



LUDOVIC CARÈME POUR « LE MONDE »

PROPOS RECUEILLIS PAR
NICOLAS BOURCIER

Envoyé spécial, Sao Paulo (Brésil)

L'agronome Antonio Donato Nobre, 56 ans, est un des meilleurs spécialistes du climat et de l'écosystème amazonien. Chercheur à l'Institut national de recherche spatiale du Brésil (INPE) et à l'Institut national de recherche d'Amazonie (INPA), il vient de lancer un cri d'alarme dans un rapport intitulé « L'avenir climatique de l'Amazonie », alors que la sécheresse et la crise hydrique frappent l'Etat de Sao Paulo. Le document, d'une quarantaine de pages, est une synthèse de plus de 200 enquêtes et articles scientifiques consacrés à la forêt amazonienne et à la déforestation.

Les dernières observations révèlent une forte recrudescence de la déforestation en Amazonie. De quoi parle-t-on ?

Si on ne prend que les coupes claires, c'est-à-dire cette façon de couper les arbres au ras, on a détruit au cours des quarante dernières années 763 000 km² de forêt. Cela signifie que 184 millions de terrains de football ont été rasés depuis les années 1970, soit deux fois la superficie de l'Allemagne. Il faut s'imaginer un tracteur avec une lame de trois mètres de long roulant à 756 km/h pendant quarante ans sans interruption : une sorte d'engin de fin du monde.

D'après l'ensemble des estimations, cela représente 42 milliards d'arbres détruits, soit 2 000 par minute ou 3 millions par jour ! C'est un chiffre dont il est difficile d'imaginer toute la monstruosité. Et ici, nous ne parlons que du « rasage ». On évoque rarement les forêts endommagées et dégradées par l'homme, toutes ces zones que les photos satellites ne distinguent pas et où il ne reste que quelques arbres qui masquent une déforestation plus graduelle. Or, il s'agit là de régions entières où la forêt n'est plus fonctionnelle et n'agit plus en tant qu'écosystème.

D'après les indices de dégradation relevés entre 2007 et 2010, la zone couvre 1,3 million de km² de forêt dévastée à différents stades. En additionnant ce chiffre aux espaces rasés, on atteint environ 2 millions de km², soit 40 % de la forêt amazonienne brésilienne. Sans oublier que, de l'autre côté des frontières, au Pérou, en Colombie, en Bolivie et même au Paraguay, on observe également une augmentation de la déforestation.

Comment mesurer les conséquences ?

Chaque arbre retiré de l'Amazonie se ressent sur le climat. Il faut comprendre que cette forêt est une usine de service environnemental. Chaque arbre y forme un système complexe et très riche. Ensemble, ils représentent une gigantesque pompe à eau. Ils inhalent l'air et transpirent de la vapeur d'eau qu'ils évaporent ensuite dans l'atmosphère. Un grand arbre amazonien rejette plus de 1 000 litres d'eau par jour. D'après nos calculs, la forêt du bassin amazonien émet dans l'atmosphère l'équivalent de 20 milliards de tonnes d'eau par jour, plus que le fleuve Amazone n'en déverse dans l'océan Atlantique (17 milliards de tonnes).

Votre document renvoie à quatre autres « secrets amazoniens ». Quels sont-ils ?

Le deuxième « secret » réside dans la pureté de l'air amazonien. Les nuages en Amazonie ressemblent beaucoup aux nuages en mer. A la fin des années 1990, les scientifiques avaient appelé cela l'« océan vert ». Mais il y a un paradoxe : les océans bleu et vert n'ont pas la même pluviométrie. Pourquoi au-dessus de la forêt observe-t-on

d'importantes précipitations que l'on ne rencontre pas sur les océans ? On sait aujourd'hui que les arbres émettent des substances volatiles que l'on pourrait comparer à des fragrances, des odeurs, et qui se précipitent en une poussière très fine, les « *pixy dusts* ». Ce sont ces particules invisibles qui participent à la formation des nuages et qui engendrent ensuite des pluies relativement fortes, mais douces, très génératrices de vie.

Le troisième « secret » ?

Il se niche dans la survivance de cette forêt. Celle-ci a su perpétuer sa biodiversité depuis cinquante mille ans, et ce, malgré les cataclysmes, les réchauffements, les périodes de glaciation, etc. L'Amazonie s'est développée de manière ininterrompue pendant tout ce temps parce qu'elle a précisément une capacité à produire un climat favorable à elle-même. C'est la théorie de la pompe biotique. La forêt produit d'immenses flux de vapeur et diminue la pression atmosphérique. Elle pompe de l'air des océans et modifie l'atmosphère. Avec les racines des arbres qui plongent à plus de 20 mètres de profondeur, la forêt est liée à un océan d'eau douce sous ses pieds. Même dans une situation externe défavorable, l'Amazonie pourrait encore créer des pluies. Elle produit pour elle-même et exporte des nutriments et de l'eau avec les vents.

Est-ce la raison pour laquelle ce continent est différent des autres régions du monde ?

Oui et c'est le quatrième secret de l'Amazonie. La forêt maintient l'air humide et l'exporte. Plusieurs mois par an, elle déverse cette humidité à travers des « rivières aériennes de vapeur » vers une région qui s'étend de Cuiaba à Buenos Aires au sud et de Sao Paulo aux Andes. A cette même latitude, on tombe sur les déserts de l'Atacama, du Kalahari en Namibie et le bush australien. Or, ici, la circulation de l'eau fonctionne avec la chaîne des Andes qui joue le rôle d'un mur de 6 000 mètres de haut. Aujourd'hui, ce vaste quadrilatère est

irrigué, contient de l'humidité et produit 70 % du produit intérieur brut sud-américain. Le problème, c'est que nous détruisons avec cette déforestation les sources de ces rivières volantes. Sans les services de la forêt, ces régions productrices pourraient avoir un climat presque désertique.

Où en sommes-nous ?

Le changement climatique n'est plus une prévision scientifique mais une réalité. Les émissions de CO₂ ne cessent d'augmenter et les changements prédits par les scientifiques arrivent avec plus de rapidité qu'on ne l'imaginait. Prenez l'« arc de déforestation », la partie sud de l'Amazonie où le climat a déjà changé. Les périodes de sécheresse ont augmenté et le volume des pluies a diminué. Dans l'Etat du Mato Grosso, les planteurs de soja ont déjà retardé l'ensemencement. On voit des effets similaires au sud et à l'est de l'Amazonie se reproduire d'année en année. La sécheresse de 2005 était la pire du siècle. Celle de 2010 était déjà pire que celle de 2005 et voilà la sécheresse exceptionnelle de cette année qui pourrait battre tous les records. Les effets externes de la déforestation amazonienne sont déjà une réalité. Le système est en train de se détraquer.

Comme dans l'Etat de Sao Paulo ?

Tout le monde dit que le Brésil dispose de ressources infinies. Mais on oublie que, sans cette forêt, nous n'aurions pas tout cela. Bien sûr, le climat change partout dans le monde, mais nous avions avec l'Amazonie un formidable absorbeur de chocs que nous sommes en train de perdre. Lorsque nous avons détruit pendant cinq cents ans la forêt Atlantique [en bordure de l'océan], nous n'avons rien senti parce que justement nous avions cette Amazonie protectrice derrière nous. Aujourd'hui, nous sommes en train de la détruire et cela s'en ressent à des milliers de kilomètres de là. Je n'ai rien contre l'agriculture, mais quelle sorte d'agriculture peut-on faire sans eau ?

Antonio Donato Nobre

« Il faut un effort de guerre pour reboiser l'Amazonie »

ENTRETIEN | Alors qu'une sécheresse record frappe le Brésil, ce spécialiste du climat s'alarme de l'impact de la déforestation sur le cycle de l'eau

Et le cinquième « secret » ?

Il n'y a pas d'ouragan en Amazonie. La forêt est un pondérateur des phénomènes atmosphériques et un régulateur du climat. Or celui-ci commence à présenter des failles.

Dans une interview en 2009 au quotidien *Valor*, vous annonciez un sérieux problème d'eau et de climat dans les cinq ou six ans à venir. Qu'en est-il ?

Je ne sais pas à quel point de retour on est arrivé. Il y a de grandes preuves que la crise climatique est liée à la déforestation de l'Amazonie. La situation extrêmement sérieuse et les estimations sur les changements à venir sont effrayantes. La science avait prévu ce scénario, mais cela n'a rien changé. Ici, le gouvernement brésilien a fait un très bon travail de 2004 à 2012 en réduisant les déboisements de 27 000 km² par an à 4 000 km². Mais le nouveau code forestier, qui a amnistié ceux qui déboisent, a envoyé un signal d'impunité et tout a repris. Pour filer la métaphore, je dirai que nous sommes dans le *Titanic* et que l'iceberg est déjà en vue. Nous sommes tout près et vogueons à grande vitesse.

Vous restez optimiste malgré tout !

Le déboisement zéro ne suffit plus. Il faut faire un « effort de guerre » pour stopper la déforestation et reboiser tout ce qui a été coupé. Des techniques existent pour reconstruire les écosystèmes, d'autres sont à inventer. Les gouvernements du monde, les entrepreneurs et les élites doivent réagir comme lors de la crise financière de 2008. En quinze jours, ils ont trouvé des milliards de dollars pour sauver le système bancaire. Nous devons faire pareil pour éviter l'abîme climatique.

Quel sera le coût ?

Le prix à payer sera bien moins élevé que le coût de la déforestation. Les dernières estimations sont d'environ 7 milliards de dollars, une goutte d'eau pour l'économie mondiale. ■

La famille homoparentale a son étude

VIE DES LABOS



PASCAL SANTI

En savoir plus sur le devenir des enfants des homosexuels, tel est le but de l'enquête « Homoparentalité, fonctionnement familial, développement et socialisation des enfants », appelée Devhom. Lancé en mars par une quinzaine de chercheurs, le projet est porté par le Laboratoire clinique de l'acte et psychosexualité (CAPS, université de Poitiers), le Laboratoire de psychologie des pays de la Loire (Angers) et le Centre universitaire de recherches sur l'action publique et le politique (CNRS, Amiens). S'appuyant sur les recherches déjà effectuées en France et à l'étranger sur l'homoparentalité, cette enquête a été financée par l'Agence nationale de la recherche et la caisse nationale d'allocation familiales.

Pour l'heure, 150 familles ont été recrutées pour l'axe quantitatif de la recherche, sur un objectif final de 200, avec des enfants nés en 2011-2012 et en 2004-2005.

« L'objectif essentiel de ce projet est d'étudier le développement et les modalités de construction psychoaffective des enfants issus de familles homoparentales », explique Alain Ducouso-Lacaze, professeur de psychopathologie clinique à l'université de Poitiers et directeur du CAPS, qui coordonne ce projet. Celui-ci a été conçu pour s'inscrire dans une étude plus vaste, appelée ELFE (pour Etude longitudinale française depuis l'enfance), qui vise à étudier 18 000 enfants et leurs familles, sur vingt ans, sous l'angle des sciences sociales, de la santé...

Mais le recrutement de familles homoparentales dans le cadre de la cohorte ELFE – effectué en maternité – s'est révélé bien trop faible, avec seulement 16 familles. Ce qui a donc conduit à recourir à un recrutement, toujours en cours, par autoadhésion par le biais d'associations, de réseaux sociaux ou par le site Yagg, média des lesbiennes, gays, bi et trans.

L'originalité du projet Devhom est de faire porter la recherche sur les enfants, ce qui est encore assez rare. Outre le volet quantitatif, qui reprend le dispositif ELFE (questionnaires, tests cognitifs...), un axe qualitatif important comporte deux volets : socioanthropologique, qui consiste en des entretiens sur la façon dont les familles construisent des liens de parenté ; de psychologie clinique, qui se concentre sur l'étude de vingt familles, dont dix avec des enfants âgés de 3 à 4 ans et dix avec des enfants de 9 à 11 ans. « Au cours de l'entretien, on rencontre les parents et les enfants. On leur propose de nous raconter leur histoire en faisant leur arbre généalogique, leur génogramme », explique Alain Ducouso-Lacaze.

Faire famille

« Ce qui nous intéresse, c'est la manière dont ces familles vivent dans leur environnement social leur vie quotidienne. La manière dont elles inscrivent leurs enfants dans leur parenté et ce qu'elles disent à l'enfant de leur situation familiale », souligne Jérôme Courdurières, anthropologue à l'université Toulouse-Jean-Jaurès. Les configurations familiales sont en effet très variées : enfants nés d'unions hétérosexuelles précédentes, adoptions, enfants nés par insémination avec donneur (connu ou inconnu), gestation pour autrui (illégal en France), ou d'autres formes de coparentalité. Quelle place donner à chacun(e), la loi française n'autorisant qu'une mère alors que les conjoint(e)s assurent aussi le rôle parental auprès de leurs enfants, fait remarquer Virginie Descoutures, de l'Institut national d'études démographiques, qui participe au projet.

« Nous partons de l'idée que ces enfants construisent des bases essentielles pour la vie psychique à travers l'inscription dans la parenté et dans la succession des générations. Comme ce sont des familles non conventionnelles, nous nous interrogeons sur la manière dont ça se passe pour eux, sur les voies qu'empruntent ces familles pour faire famille », explique Alain Ducouso-Lacaze. En l'absence de lien biologique et légal de filiation, comment nomme-t-on les grands-parents, les oncles et tantes, comment s'organisent les fêtes de famille, comment décrit-on la situation familiale lors de l'inscription en crèche ou auprès d'une nounou ?, questionne Jérôme Courdurières.

Ces recherches réunissent pour la première fois sociologues, anthropologues, psychologues sociaux et cliniciens, psychanalystes. Le projet a nécessité un grand travail sur la méthodologie. Les premiers résultats seront rendus fin 2015. ■

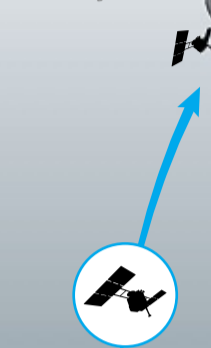
La mission japonaise Hayabusa-2 à la rencontre d'un astéroïde

Les prouesses de la sonde Rosetta et de son robot Philae s'estompent à peine que s'annonce une mission tout aussi acrobatique. Le 30 novembre, l'Agence spatiale japonaise lancera Hayabusa-2 (« faucon pèlerin ») à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃, qu'elle atteindra en juin 2018. Pour la première fois, un atterrisseur Mascot, développé sous la responsabilité des agences spatiales allemande et française, sera largué pour se poser et analyser les propriétés et la composition du sol, pendant la douzaine d'heures de sa mission. L'un de ses instruments, développé en France par l'Institut d'astrophysique spatiale (université Paris-Sud), est un microscope spectral capable d'identifier les matériaux de surface : minéraux, glaces et surtout matière organique éventuelle. Car contrairement à l'astéroïde Itokawa, visité par Hayabusa-1 en 2005, 1999 JU₃ est susceptible de contenir de la matière carbonée. Des échantillons seront prélevés par une sorte d'aspirateur sous la sonde, puis rapportés sur Terre en décembre 2020 dans une capsule. La composition de cet astéroïde serait assez proche des premières briques ayant servi à constituer la Terre. Les astéroïdes, aujourd'hui principalement localisés entre Mars et Jupiter, se sont formés plus près du Soleil que les comètes. Comme avec les comètes, les chercheurs sont en quête de nos origines. ■

DAVID LAROUSSERIE

Outre des caméras et autres capteurs infrarouge, la sonde déposera quatre instruments, Mascot et trois modules Minerva identiques à ceux de la première mission. Mascot a la possibilité de faire des sauts sur la surface afin de sonder plusieurs sites de l'astéroïde.

Juin 2018
Arrivée au-dessus de l'astéroïde 1999 JU₃



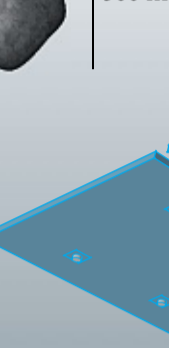
30 novembre 2014 (prévision)
Lancement



INFOGRAPHIE : HENRI-OLIVIER

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

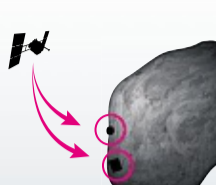
900 m



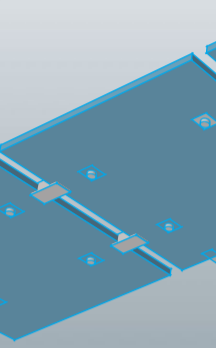
Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Observation à distance et au sol



Libération des modules Mascot et Minerva



Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

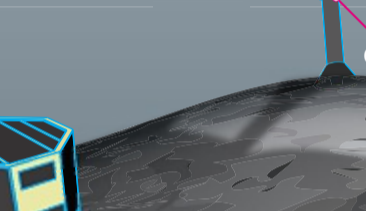


Premier prélèvement au sol

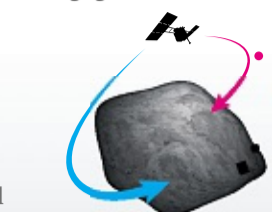


Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Largage d'une bombe



Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Grâce à un cornet d'échantillonnage, Hayabusa-2 prélèvera de la matière du sol de l'astéroïde. En larguant une bombe, elle créera un cratère dans lequel elle récupérera aussi de la matière. Une capsule ramènera ces échantillons sur Terre.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Deuxième récupération de matière



Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Décembre 2019
Retour vers la Terre

Après son lancement du Japon, la sonde Hayabusa-2, de 500 kg sera propulsée par un moteur ionique à la rencontre de l'astéroïde 1999 JU₃.



Décembre 2020
Largage de la capsule contenant de la matière d'astéroïde



SOURCE : JAXA

La collection « Grandes idées de la science » explore la vie et les théories des plus grands physiciens et mathématiciens. Le dixième numéro est consacré à Carl Friedrich Gauss

A l'origine du « livre des livres »

COLLECTION « GRANDES IDÉES DE LA SCIENCE »

PHILIPPE PAJOT

Carl Friedrich Gauss (1777-1855) était précocement doué pour les mathématiques. A ce propos, on raconte souvent l'anecdote suivante : âgé de seulement 10 ans, alors que l'enseignant avait demandé à ses élèves de calculer la somme de tous les nombres entiers (1 + 2 + 3 + 4...) jusqu'à 100, Gauss avait remarqué qu'en écrivant cette somme dans un sens, puis en l'ajoutant terme à terme dans l'autre sens, il obtenait à chaque fois 101. Il suffisait donc de multiplier 101 par 100 (le nombre de termes) et de diviser par deux pour obtenir la somme recherchée (5050) en quelques instants alors que ses camarades poursuivaient laborieusement leurs additions...

S'il est surtout connu comme mathématicien, Gauss a occupé toute sa vie professionnelle en tant qu'astronome. Il a obtenu d'importants résultats en as-

tronomie ainsi qu'en physique. A la fin du XIX^e siècle, grâce à son aura, sa ville de Göttingen deviendra un important centre de mathématiques qui rayonnera à travers le monde. Parmi ses multiples centres d'intérêt, l'arithmétique est sans doute un de ceux où son influence s'est fait le plus sentir. Une influence qui perdure jusqu'à aujourd'hui, puisque la médaille Fields attribuée cet été au mathématicien canadien Manjul Bhargava a récompensé des travaux qui sont un héritage direct de ceux de Gauss.

Une partie essentielle de l'arithmétique de Gauss se trouve dans un ouvrage qu'il a écrit alors qu'il n'avait pas 20 ans. Ses *Recherches arithmétiques* (*Disquisitiones arithmeticae*) rassemblent ce qui était connu en théorie des nombres à l'époque. Il y fait un travail d'unification des connaissances arithmétiques, introduisant de multiples nouveautés. Publié en 1801, ce livre devient pour beaucoup de ses contemporains un livre de chevet dans lequel ils puiseront leur inspiration, le « *livre des livres* », comme le baptise Leopold Kronecker. Une inspiration qui perdurera jusqu'à une période très récente. « *Une longue lignée de mathématiciens tels qu'Evariste Galois (1811-1832), Emmy Noether (1882-1935) ou André Weil (1906-1998) s'est explicitement appuyée sur cet ouvrage de jeunesse de Gauss* », explique Catherine Goldstein, historienne des mathématiques au CNRS. Que contient ce livre de si extraordinaire ?

On peut le séparer essentiellement en trois parties. Dans la première, Gauss introduit la notion de congruence, qui permet de discuter les questions de divisibilité sur des entiers à la manière des équations. On va pouvoir dès lors additionner des congruences, les multiplier, etc. « *Gauss montre que les congruences sont un outil puissant pour résoudre un certain nombre de questions en théorie des nombres* », raconte Catherine Goldstein.

La deuxième partie de l'ouvrage aborde les formes quadratiques, des expressions qui généralisent des sommes de carrés. En faisant une espèce de bestiaire de ces objets mathématiques abstraits vont apparaître des méthodes qui contiennent en germe la notion de groupe. Elle sera plus tard formalisée par Galois et d'autres. Dans cette même partie, il s'interroge sur la manière de composer entre elles les formes quadratiques. Partant de formes quadratiques qui sont déjà des objets assez abstraits – ce ne sont pas simplement des nombres –, il explique quelles opérations il est possible de faire sur ces objets. « *C'est en étendant ces lois de composition à des formes plus complexes que les formes quadratiques que Bhargava a développé dans les années 2000 les résultats qui viennent de lui valoir la médaille Fields* », souligne Catherine Goldstein.

Enfin, dans une troisième partie, Gauss utilise ses résultats sur les congruences pour traiter certaines équations que l'on appelle équations du cercle. Il s'agit d'équations dont les solutions sont les racines de l'unité, des équations du type $x^n - 1 = 0$. Gauss explique les conditions pour résoudre cette famille d'équations. Il donne ainsi

le premier exemple d'une procédure de résolution qui fonctionne pour une famille infinie d'équations (quel que soit l'entier n). Au passage, il répond à une question qui était en suspens depuis l'Antiquité, ce qui lui vaut un grand succès : à quelle condition peut-on construire à la règle et au compas un polygone régulier inscrit dans un cercle ? Comme les sommets du polygone sont représentés par les racines de l'unité, ce problème revient à résoudre l'équation du cercle sous certaines conditions. En particulier, il démontre qu'on ne peut pas construire un heptagone régulier ainsi, mais qu'on peut construire un polygone à 17 côtés.

Les *Recherches arithmétiques* de Gauss contiennent encore d'autres résultats, notamment des tests de primalité (comment déterminer qu'un nombre est premier) qu'il discute en théorie et

avec des exemples numériques. Un chapitre non publié a été récemment retrouvé sous forme de brouillon. Or ce chapitre est en fait une ébauche de la théorie des corps finis, qui ne sera développée que cinquante ans plus tard. C'est aussi dans ce livre que l'on trouve pour la première fois des démonstrations mathématiques longues et détaillées. Un changement d'esprit par rapport à ce qui était pratiqué à l'époque et qui va influencer durablement le développement ultérieur des mathématiques. « *On a l'impression, s'exclame, admirative, Catherine Goldstein, qu'il s'agit d'un livre inépuisable dans ses techniques.* » ■

Les tribunes libres sont en ligne sur www.lemonde.fr/sciences. Si vous souhaitez soumettre un texte, prière de l'adresser à sciences@lemonde.fr

La théorie des nombres

Baptisé « le prince des mathématiciens », Gauss est à l'origine d'avancées considérables dans des domaines aussi divers que les mathématiques, la physique ou l'astronomie. D'origine modeste, il fut le protégé du duc de Brunswick, qui lui permit de se consacrer à sa vocation. Le scientifique allemand lui dédia son premier livre sur la théorie des nombres, *Disquisitiones arithmeticae*. La construction à la règle et au compas d'un polygone régulier à 17 côtés qui occupait les mathématiciens depuis la Grèce classique constitue l'une de ses premières grandes découvertes. Prenant la suite de d'Alembert, Gauss démontra ensuite le théorème fonda-



mental de l'algèbre. Mais le résultat qui le fit connaître auprès de ses contemporains est sans conteste le calcul de l'orbite de l'astéroïde Cérés, qui lui valut le poste de directeur de l'observatoire de Göttingen. ■

9,99 €, en vente le 26 novembre.

Le Monde
70 ANS D'HISTOIRE
LE LIVRE ANNIVERSAIRE

En vente sur
www.lemonde.fr/boutique et en librairie