

science Le Monde & médecine



Entretien L'économie, très physique

Polytechnique crée une chaire consacrée à l'éconophysique. Son titulaire, Michael Benzaquen, expose les enjeux de cette discipline méconnue.

PAGE 8

La matière manquante retrouvée

Une énigme tenace de la cosmologie vient peut-être de céder : la masse manquante de la matière ordinaire se cacherait dans les gaz chauds des filaments interstellaires. Une mesure effectuée par le télescope spatial Chandra de la NASA.

PAGE 3

Bipolarité : des patients en formation

L'éducation thérapeutique, qui vise à mieux contrôler sa maladie, est encore peu développée en psychiatrie. Reportage en Haute-Garonne, auprès de personnes atteintes de troubles bipolaires.

PAGE 2



Les bugs de l'intelligence artificielle

Les succès de l'IA dans les domaines les plus divers, de la conduite automatique à la création de portraits réalistes, en passant par le diagnostic médical, feraient presque oublier qu'elle reste faillible. Enquête sur les points aveugles de cette technologie conquérante

DAVID LAROUSSERIE

Côté face, tout va bien pour l'intelligence artificielle, surtout pour son volet dit d'apprentissage automatique (ou statistique). Depuis le début des années 2010, elle vole de succès en succès. Ses algorithmes battent les humains au jeu de go, aux échecs, au poker, au casse-briques ou aux jeux d'arcade. Ils conduisent des voitures autonomes sur des milliers de kilomètres (presque) sans accident mortel. Commandés par la voix, ils lancent des flux radio, des achats en ligne, des bulletins météo... Ils diagnostiquent mieux que les médecins.

Côté pile, c'est moins riant. « Je ne ferais pas confiance à une très grande partie des découvertes en cours qui recourent à de l'apprentissage automatique appliqué à de grands ensembles de données », a prévenu le 15 février Genevera Allen, de l'université Rice, lors du congrès annuel de l'Association américaine pour l'avancement de la science, comme le rapporte le *Financial Times*. Dans leurs articles de recherche ou des tribunes publiées dans les médias, des spécialistes parlent d'« intelligence artificielle trompée », de « failles dans l'apprentissage automatique », de « crise », de « trouble profond »...

C'est l'intelligence artificielle même qui est touchée au cœur : des systèmes de reconnaissance d'images prennent des vessies pour des lanternes, des « pirates » attaquent les algorithmes et les font dérailler, les corrections des biais touchant ces algorithmes mettent à l'épreuve les statisticiens et les plus visionnaires réfléchissent à la manière de rendre plus intelligentes ces machines qui, il faut bien le dire, sont encore assez bêtes.

Evidemment, corriger ces défauts devient prioritaire, d'autant que l'avenir promet des applications bien plus critiques que de jouer au go ou distinguer un chaton d'un lapereau : diagnostic médical, conduite de véhicules, aide à la décision pour des verdicts judiciaires, pour l'attribution de crédits...

Alors dans les labos, pendant que certains bricolent leur système pour être meilleurs que les concurrents, d'autres ne parlent que de quête de « robustesse », « fiabilité », « certification », « reproductibilité », « confiance », « équité »...

Avant de passer en revue ces défauts et les corrections que tente d'y apporter la communauté scientifique, rappelons brièvement ce que sont ces systèmes d'apprentissage automatique.

Comme leur nom l'indique, il s'agit, tel un enfant, d'apprendre par l'exemple. On montre au programme informatique des cas particuliers afin qu'il ajuste ses paramètres pour coller à la bonne réponse fournie (par exemple la nature de l'objet dans l'image). Puis, magie de la technique, même pour une image inconnue, le système généralisera et donnera la bonne réponse. « Petit » détail, la fonction mathématique qui permet de passer des images aux réponses contient des millions, voire des milliards de paramètres. Historiquement, ces paramètres ont été comparés à des neurones, d'où le nom de « réseaux de neurones », dont une variante est appelée *deep learning*. Une autre façon de voir ces algorithmes est de se les imaginer capables, dans un espace immense où chaque point serait une image, de tracer une frontière géométrique séparant les objets de nature différente.

→ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

L'éducation thérapeutique pour s'approprier la bipolarité

PSYCHIATRIE - En Haute-Garonne, des patients atteints d'un trouble bipolaire se forment sur leur propre pathologie. Un dispositif encore rare

HAUTE-GARONNE - envoyée spéciale

Autour d'une table ovale, huit femmes et quatre hommes s'installent, se saluent et se sourient. Ils sortent devant eux des pochettes jaunes, vertes ou rouges et des blocs-notes. Une participante pose au centre deux boîtes de chocolats à l'emballage doré. Comme chaque lundi après-midi se tient dans un centre médico-psychologique de Toulouse une session d'éducation thérapeutique du patient (ETP) à destination de personnes atteintes d'un trouble bipolaire. Pour s'y inscrire, il faut être stabilisé, c'est-à-dire dans une phase de la maladie sans épisode aigu, la bipolarité étant une alternance de troubles de l'humeur avec des phases d'exaltation et de dépression, et une hyperactivité émotionnelle.

Ici, on apprend sur sa maladie, encadré par une médecin, une assistante sociale et une infirmière, pour mieux communiquer ensuite avec ses soignants. «*Le but est de réfléchir sur ses propres symptômes*, explique Barbara Combes, psychiatre, créatrice de ce programme nommé Bipolis et de l'ebook *Penser et pratiquer l'ETP en psychiatrie* (éd. Santé mentale). *On donne du savoir, on aide les patients à acquérir leur autonomie et des stratégies pour mieux gérer les rechutes et en identifier les signes annonciateurs.*» Les «SARA», stages d'aide au rétablissement ambulatoire, sont indépendants les uns des autres et peuvent être suivis à volonté par les patients. Quatre thèmes s'étalent sur l'année : l'appropriation de la maladie et de son traitement, la socialité, l'hygiène de vie et les rechutes.

Rendre le patient expert

Anais (les prénoms ont été changés), 45 ans, professeure à l'université, assiste aujourd'hui à sa dernière session, clôturant ainsi un cycle d'un an d'éducation thérapeutique. «*Le parti pris de rendre le patient expert est très intéressant*, dit d'une voix douce cette mère de trois enfants. *Ici, c'est un endroit où je prends un temps pour moi, pour m'approprier la maladie, car elle n'a pas beaucoup de place dans ma vie. J'en parle surtout avec deux amies proches, mon mari considérant qu'il ne faut pas trop que cela s'immisce dans notre quotidien, et ma mère étant dans le déni.*»

Pour la dernière heure et demie du SARA socialité, Chantal Balansa, assistante sociale, ouvre la session. «*Après six séances, on vous présente le tableau d'importance que vous remplirez chez vous pour noter vos impressions par rapport à tout ce dont on a parlé : la gestion de votre budget, le travail, les relations avec vos proches, la stigmatisation, l'estime de soi.*»

«*C'est des devoirs ?*», plaisante Michel, patient de 53 ans. «*Oui, mais il n'y aura pas de contrôle !*», réplique la docteure Combes, tout sourire.

L'assistante sociale propose de visionner un court film sur les groupes d'entraide mutuelle, des associations d'usagers de la psychiatrie qui se réunissent autour d'activités. Après le film, Chantal Balansa questionne : «*Qu'est-ce que vous en avez pensé ?*» Nathalie, 64 ans, cheveux blancs tombant sur ses épaules et lunettes de vue noires,

prend la parole : «*J'ai aimé le fait qu'une personne interviewée dise avoir retrouvé l'envie de faire des sorties grâce au groupe. Car, quand on sort d'hospitalisation, on a été dépossédé de plein de choses. La confiance en soi nous déserte par moments.*» Christine, 67 ans, un blouson noir à fleurs roses sur le dos, poursuit : «*La maladie nous plonge dans l'exclusion, donc tout ce qui nous fait recréer du lien social, comme ici, est positif.*»

L'assistante sociale questionne le groupe sur l'apport des précédentes séquences. «*Moi, je suis plus sereine quand je sors d'ici*», répond Christine. «*Elle s'est mise au yoga*», lance Anais, déclenchant

un rire collectif. Christine reprend : «*Je viens pour me soigner, pour apprendre, pour partager, et c'est vrai que le yoga m'a fait du bien, c'est Anais qui me l'a conseillé.*» Barbara Combes rebondit : «*Ici, on essaye de transmettre l'envie de travailler sur soi-même et l'envie d'être à nouveau heureux.*»

Une patiente souligne aussi la dynamique entre patients et soignants. «*On ne sent pas le poids du soignant qui arrive avec sa science.*» Barbara Combes confirme : «*Ça ne servirait à rien. Il faut savoir se mettre dans une posture différente pour vous amener à l'observance. Malheureusement, l'éducation thérapeutique ne fait pas encore*

partie de la routine du soin en psychiatrie.» Sur les 4 000 programmes autorisés par les agences régionales de santé, seuls 5 % sont destinés à des patients souffrant de troubles psychiques. Pourtant, depuis 2009, le code de la santé publique recommande «*l'éducation thérapeutique, qui s'inscrit dans le parcours de soins du patient*». La docteure Combes en a mis en place à l'hôpital Gérard-Marchant, à Toulouse, dès 2009, avant même la promulgation de cette loi.

La conversation du groupe s'oriente sur la stigmatisation de la bipolarité, tandis que les chocolats circulent. Marine, la cinquantaine et les cheveux poivre et sel, raconte qu'elle ne parle pas de sa pathologie au travail. «*J'ai peur d'être cataloguée avec toutes les représentations qui sont faites dans les films*, précise-t-elle. *Il y en a un où un personnage bipolaire se prend pour un oiseau !*» «*Ça n'a rien à voir avec la réalité de la bipolarité*», se désole Barbara Combes.

Arnaud, 37 ans, informaticien, renchérit. «*Quand je suis retourné au travail après mon hospitalisation, j'ai dû rattraper l'image que les autres avaient de moi, car je me sentais rabaisé par la maladie.*» Arnaud est un patient expert. Ce statut signifie qu'il a suivi quarante heures de formation à l'éducation thérapeutique, en plus d'avoir assisté à chaque SARA.

Lutter contre la stigmatisation

Le lendemain, à Carbone, une commune rurale de Haute-Garonne, une dizaine de patients terminent eux aussi leur SARA socialité. Dehors, les oiseaux gazouillent, sous un ciel bleu sans l'ombre d'un nuage. Il est 11 h 30 et, comme chaque mardi, la discussion s'ouvre. Martine, 51 ans, cheveux auburn, commence : «*C'est la deuxième fois que je suis le cycle et je découvre encore des choses que je n'avais pas repérées sur ma maladie. J'ai plus de capacités pour maîtriser des événements difficiles qui pourraient survenir.*» Barbara Combes abonde : «*On ne va pas arriver à zéro rechute, par contre, on peut apprendre à faire en sorte qu'elle soit le moins grave possible.*»

Comme à Toulouse, la conversation s'oriente vers la stigmatisation. Michel, présent aussi la veille, a apporté un enregistrement d'une émission d'une grande radio sur les personnes souffrant d'une maladie psychique. La journaliste parle de «*trouver des solutions pour soigner ces malades et pour nous en protéger aussi.*» «*Oh, quelle bourde !*», s'offusque la docteure Combes. Michel hoche la tête : «*Tout son vocabulaire était négatif.*» Martine s'amuse : «*On dirait un peu qu'elle parle de morts-vivants qui envahissent les rues !*» Barbara Combes apporte une réflexion : «*Vous êtes des personnes avant tout, ce n'est pas votre identité la bipolarité. Je crois que la société est encore bloquée à l'archétype du patient sous traitement qui bave.*» Michel acquiesce. «*Pourtant, on n'est pas comme ça, dit-il. Moi, mon traitement me va totalement. Je refais du sport, j'ai perdu du poids. Et ici, avec l'éducation thérapeutique, on me donne des outils pour avoir un quotidien plus facile. C'est comme une deuxième vie, c'est reposant. Je suis heureux de me lever le matin. Je vais mieux.*» ■

SOPHIE BOUTBOUL



L'Agence du médicament s'inquiète des overdoses d'opioïdes

ADDICTION - Un rapport de l'ANSM souligne la forte augmentation en France du mésusage de ces médicaments antidouleur

Plus de morts, plus d'hospitalisations, plus de consommation. Les problèmes liés à la mauvaise utilisation des médicaments antidouleur opioïdes ont fortement augmenté en France ces dernières années. C'est ce que montre un rapport sur l'état des lieux de la consommation, publié par l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) le mercredi 20 février.

Les chiffres sont impressionnants : + 167 % pour le nombre d'hospitalisations liées à la consommation de ce type de médicament qui a presque triplé entre 2000 et 2017, passant de 15 par million d'habitants à 40 par million ; + 146 % pour le nombre de décès entre 2000 et 2015, soit de 1,3 à 3,2 par million. Soit plus de quatre décès par semaine. Un bilan largement sous-estimé en raison de difficulté de collecte des données. Une certitude : ces

morts par médicaments constituent désormais la première cause de mortalité par overdose, devant l'héroïne.

Près de dix millions de Français se sont vu prescrire des antalgiques opioïdes en 2015, indique le rapport de l'ANSM. Un chiffre qui atteignait 12 millions en 2017. Deux molécules se détachent : le tramadol (délivré à 5,8 millions de personnes en 2017) est le plus consommé, avec une hausse de 68 % en dix ans, en partie du fait de l'interdiction du Di-Antalvic à partir de 2011. Il appartient aux opioïdes dits « faibles ».

Le tramadol très prescrit

«*Le tramadol est la molécule qui pose le plus de problèmes. On peut s'étonner que ce traitement, qui est le moins bien toléré, soit le plus prescrit*», constate le professeur Nicolas Authier, chef du service de pharmacologie et du centre de

la douleur du CHU de Clermont-Ferrand, et directeur de l'Observatoire français des médicaments antalgiques (OFMA).

Parmi les opioïdes dits « forts », une molécule se détache : l'oxycodone, + 738 % de 2006 à 2017. En 2017, un million de Français ont reçu une prescription sécurisée (infalsifiable) d'un antalgique fort (morphine, oxycodone, fentanyl), deux fois plus qu'il y a douze ans, souligne l'OFMA. Faibles ou fortes, ces molécules partagent le même mécanisme d'action sur les récepteurs du cerveau. Le fentanyl est à lui seul cent fois plus puissant que l'héroïne.

La prise en charge de la douleur s'est améliorée depuis le début des années 2000, mais ces médicaments à base d'opium, utilisés au départ pour atténuer les douleurs cancéreuses, ne sont pas forcément prescrits à bon escient. Il y a par ailleurs trop de prescriptions

pour des types de douleur pour lesquels ces produits ne sont guère efficaces, comme les migraines, la fibromyalgie, l'arthrose... Or une dépendance peut s'installer très vite, sans que l'on s'en rende compte. Outre la douleur, «*ces médicaments agissent aussi sur le psychisme, les émotions, l'anxiété*», dit Nicolas Authier.

Accros à leur insu

Certains en prennent jusqu'à plusieurs dizaines par jour, comme en témoigne le reportage diffusé jeudi 21 février sur France 2 dans l'émission « Envoyé spécial ». On est loin du profil classique de l'usager de drogues : les plus touchées par cette dépendance sont des femmes, et nombre d'entre elles deviennent accros à leur insu, note l'addictologue Jean-Michel Delile, président de la Fédération Addiction. Ces chiffres impressionnants restent toutefois loin de ceux des

Etats-Unis, où cette addiction aux opioïdes a causé la mort de près de 48 000 personnes pour la seule année 2017 (130 décès par jour).

Pour autant, «*il y a un certain nombre de signaux qui nous incitent à être très vigilants. Cette évolution est inquiétante*», reconnaît Nathalie Richard, directrice adjointe des médicaments antalgiques et stupéfiants à l'ANSM. L'agence va donc mettre en place plusieurs actions pour favoriser le bon usage, mieux informer les patients, avant, pendant et après le traitement, mais aussi les professionnels de santé : «*Une prescription d'antalgique opioïde doit systématiquement s'accompagner d'une information au patient sur le traitement et sur son arrêt, et d'une surveillance de ces risques, même lorsqu'il est initialement prescrit dans le respect des conditions de l'autorisation de mise sur le marché*», indique l'ANSM.

Dans les faits, c'est loin d'être le cas. Les notices ne sont pas toujours très claires. Les patients ne sont pas toujours informés pas les médecins ou pharmaciens d'un risque de dépendance. Les usagers utilisent trop souvent leur pharmacie familiale...

Aujourd'hui, les ordonnances des antalgiques dits « faibles » sont renouvelables sans revoir un médecin, la question de revoir cette disposition est posée. De même, l'agence conseille de fournir aux patients de la naloxone, antidote des overdoses aux opioïdes. Pour l'ANSM, il faut mieux identifier les patients à risque et mieux sécuriser ces produits, sans restreindre leur accès. «*Ce n'est pas une crise sanitaire*, indique Nicolas Authier, *il n'est pas question de bannir les opioïdes, il ne faut pas moins prescrire, mais mieux prescrire.*» ■

PASCALE SANTI

TÉLESCOPE

La masse manquante de l'Univers retrouvée

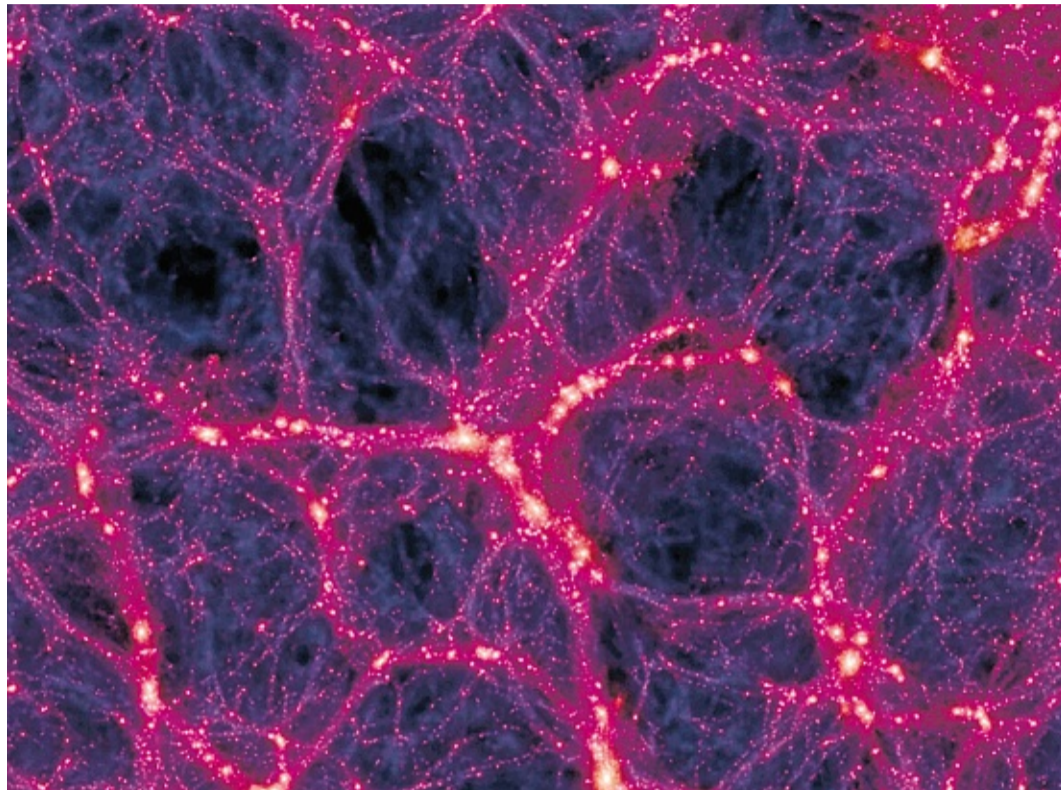
COSMOLOGIE - Une équipe américaine a montré que plus du tiers de la matière ordinaire du cosmos résidait dans l'espace interstellaire sous forme de gaz chauds

L'information a été annoncée jeudi 14 février dans la revue *The Astrophysical Journal*: une équipe américaine est parvenue à localiser la masse manquante de l'Univers. Pour la première fois, des scientifiques ont non seulement réussi à mettre en évidence la présence de cette matière sous forme de gaz chauds dans l'espace interstellaire, mais ils en ont également évalué la quantité. Selon leurs calculs, elle correspondrait bien au déficit après lequel on court depuis plusieurs décennies.

Pour comprendre la portée de cette découverte mais aussi la relative discrétion de l'annonce – qui n'a pas fait les gros titres de la presse internationale –, une précision s'impose. Ladite masse manquante n'est pas la fameuse matière noire, ce Graal que les astronomes du monde entier traquent vainement.

Si la relativité générale d'Einstein ne se trompe pas, l'Univers est composé de 68% d'énergie noire, à laquelle on ne connaît rien, si ce n'est qu'elle n'est pas de la matière; de 27% de matière noire dont on ignore à peu près tout, à part qu'elle n'interagit pratiquement avec rien. Et, enfin, de 5% de matière dite baryonique, autrement dit normale, celle qui compose tout ce que nous touchons, observons, entendons. Pour ajouter encore à notre ignorance, plus de 30% de cette matière baryonique nous était également imperceptible. Les astrophysiciens savaient qu'elle se dissimulait quelque part. Ils avaient en effet calculé la masse d'éléments chimiques produite au cours de ce que l'on nomme la nucléosynthèse primordiale, ces réactions nucléaires intervenues pendant les quinze premières minutes de l'Univers. Ils avaient également observé les grumeaux de matière dans le fonds diffus cosmologique, cette première photographie de l'Univers, qui remonte à 380 000 ans après le Big Bang. Et dans les deux cas, ils trouvaient le même résultat. Sauf que celui-ci ne correspondait pas à une troisième mesure: celle de la quantité de matière visible dans notre Univers actuel.

«Les étoiles en représentent à peine 10%, les gaz qui rayonnent dans la



Observation de gaz chauds dans l'espace interstellaire par le télescope Chandra de la NASA. NASA

galaxie et les amas de galaxies, moins de 60%, observe David Elbaz, directeur du laboratoire Cosmologie et évolution des galaxies au Commissariat à l'énergie atomique. Où est le reste? Ce qui, dans les mots de l'astrophysicienne Orsolya Kovacs, donne: «Où l'Univers pouvait-il bien planquer tant de cette matière qui forme des trucs comme les étoiles, les planètes, ou nous-mêmes.»

Chercher dans la lumière

La jeune Hongroise et l'équipe de son mentor William Forman, du centre d'astrophysique Harvard & Smithsonian, ont tranché: cette matière se trouve dans les filaments de gaz chauds qui s'étalent dans le milieu interstellaire. L'existence de ces filaments était connue. Trop chauds (plusieurs centaines de milliers de degrés) pour être perçus par les télescopes optiques, ils avaient été repérés grâce à leur lumière ultraviolette. Mais impossible d'évaluer ainsi leur masse.

L'équipe américaine y est cette fois parvenue grâce à une nouvelle

technique. Les astrophysiciens ont pointé le télescope spatial de la NASA Chandra vers une source lumineuse d'origine galactique (quasar) située à 3,5 milliards d'années-lumière de nous et ont observé comment les rayons X qu'elle émettait se trouvaient absorbés par les fameux filaments. Pas par tous les filaments de l'Univers, juste ceux situés entre nous et le quasar, rassemblés dans dix-sept nuages de gaz. Ni par tous les éléments chimiques susceptibles de s'y trouver, juste par l'oxygène.

Un pari, en vérité. «Notre technique ressemble à celle qu'on utilise pour trouver des animaux dans les plaines africaines, explique Akos Bogdan, coauteur de l'article. On sait qu'ils doivent boire, donc on les cherche près des points d'eau.» David Elbaz préfère une autre métaphore: «C'est l'histoire du fou qui ne sait pas où il a perdu ses clés et qui les cherche sous le réverbère. Sauf que là, il trouve. Pourquoi? Parce ce qu'il y a des clés partout et qu'on a alors plus de chance de les voir là où il y a de la lumière.»

Ne restait plus à l'équipe de Harvard qu'à extrapoler: de l'oxygène à l'ensemble des éléments chimiques, et de la région observée à l'ensemble de l'Univers. Elle conclut à un surplus de matière de 37%, compatible donc avec une observation de la totalité de matière manquante. «Disons qu'ils ont sans doute repéré l'essentiel», tempère David Elbaz. Une façon de dire que la course n'est pas tout à fait terminée.

En effet, de la matière pourrait encore se cacher là où il n'y a pas d'oxygène. Autre interrogation: quelle est la proportion de gaz tiède (environ 100 000 degrés) et de gaz chaud (1 million de degrés) dans cette matière manquante? Plus profond encore, pourquoi l'Univers a-t-il été si peu productif, autrement dit pourquoi 10% seulement de la matière originelle a engendré des étoiles? Et d'où vient l'énergie qui a maintenu la matière dans tous ses états? De quoi faire plancher les astrophysiciens encore quelque temps. ■

NATHANIEL HERZBERG

Nouvelles lettres dans l'alphabet génétique

BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE - Une équipe américaine a créé un ADN avec quatre nouvelles bases

Steven Benner a de la suite dans les idées. Il y a déjà trente-cinq ans, à Harvard, il contribuait à la première synthèse chimique d'un gène capable de produire une enzyme. Pionnier de la biologie de synthèse, qui vise notamment à s'inspirer des outils forgés par l'évolution pour agrandir le répertoire des molécules artificielles, il continue, depuis sa Foundation for Applied Molecular Evolution (Floride), à jouer avec les briques du vivant. Son dernier «coup»? Présenté dans *Science* du 22 février, il propose un système génétique qui comprend non pas quatre lettres, comme dans la nature, mais huit.

Ce nouveau jeu de construction a été baptisé «Hachimoji», mot-valise japonais accouplant «huit» et «lettre». La nature, dans son infinie diversité, se contente de quatre bases s'assemblant par paires dans la double hélice formant l'ADN: adénine (A) avec thymine

(T), cytosine (C) avec guanine (G). Le système présenté par Steven Benner et ses collègues comprend donc les quatre lettres originelles, plus quatre bases baptisées «Z», «P», «S» et «B». En 2015, ils avaient déjà proposé un jeu avec six lettres, dont Z et P.

Le nouvel alphabet remplit «quatre des cinq critères requis pour qu'un système moléculaire puisse être dit vivant», souligne Steven Benner. Le premier est la capacité à renfermer de l'information. Le jeu des huit bases en offre de surcroît une densité plus grande que l'alphabet naturel, souligne-t-il. La deuxième condition «est la capacité de transférer cette information à un autre système moléculaire». L'équipe a développé une enzyme pour fabriquer de l'ARN Hachimoji: ces fragments complémentaires aux séquences d'ADN remplissent quantité de fonctions, comme concourir à la production de protéines.

«La troisième chose, c'est que cette information permette aux molécules en question de faire quelque chose, qui puisse être retenu par la sélection naturelle», énumère Benner. En l'occurrence, des ARN Hachimoji se sont révélés capables de se replier pour tordre un composé et le rendre fluorescent.

Risque de dissémination

Le quatrième critère, poursuit le chercheur, «est la capacité à évoluer». Là, la stabilité de la structure en double hélice est essentielle: elle doit pouvoir se conserver alors même que des mutations, sous la forme de changements dans l'ordre des lettres, interviennent. C'est bien le cas dans les hélices d'ADN Hachimoji, contrairement à d'autres assemblages synthétiques.

Reste donc un cinquième critère, qui fait défaut à l'alphabet étendu: l'autosuffisance («self sustainability»), la capacité à trouver des ressources pour survivre

et se reproduire. «C'est délégué, pour éviter tout risque de dissémination», indique Steven Benner. Du reste, créer un organisme autonome dont tout l'ADN soit Hachimoji «est bien au-delà de nos capacités d'ingénierie», note-t-il. L'objectif est plutôt de disposer d'un registre plus étendu de composés, fabriqués en laboratoire, à des fins de diagnostic, par exemple. «Nous avons fait évoluer des fragments d'ADN Hachimoji pour créer des molécules qui peuvent se lier à des cellules de cancer du foie ou du sein, ou à des toxines d'anthrax, ou peuvent catalyser des réactions», précise Steven Benner.

Interrogé par *Nature*, Floyd Romesberg (Scripps Research Institute, Californie), qui est parvenu en 2017 à faire exprimer deux nouvelles lettres dans une bactérie *E. coli* semi-synthétique, savoure l'avancée de son rival: «C'est une percée conceptuelle», salue-t-il. ■

HERVÉ MORIN

SANTÉ

Le Parlement renforce la prise en charge des cancers de l'enfant

Le Parlement a adopté définitivement jeudi 21 février, par un vote unanime du Sénat après celui de l'Assemblée nationale, une proposition de loi favorisant une meilleure prise en charge des cancers de l'enfant. Environ 2 500 nouveaux cas sont dénombrés chaque année en France chez les moins de 18 ans. Ce texte vise à privilégier la recherche et améliorer l'accompagnement social des familles. Près de quatre enfants sur cinq sont aujourd'hui guéris, l'enjeu étant de guérir encore plus et avec le moins de séquelles possible. La loi a aussi abordé la question de l'extension du «droit à l'oubli» qui permet aux anciens malades de ne plus le mentionner lors d'une demande d'assurance emprunteur. Des discussions sont ouvertes entre les pouvoirs publics, les secteurs de l'assurance, de la banque et des représentants de patients.

PSYCHIATRIE

Grandir entouré de verdure améliore la santé mentale

Les enfants qui grandissent dans un quartier entouré de verdure ont un risque jusqu'à 55% moins élevé de développer divers troubles mentaux à l'adolescence et à l'âge adulte. C'est la conclusion d'une étude conduite par l'université d'Aarhus (Danemark), qui s'est appuyée sur des images satellitaires prises entre 1985 et 2013 permettant d'évaluer l'environnement immédiat d'environ 1 million de Danois avant leurs 10 ans. La présence d'espace vert était corrélée à une meilleure santé mentale, y compris après ajustement de différents facteurs tels que le statut socio-économique, l'urbanisation, et la présence de troubles mentaux antérieurs dans la famille. Ces résultats ont d'importantes implications en termes d'urbanisme, estiment les auteurs de l'étude. > Engemann et al., «PNAS», du 25 février

ZOOLOGIE

Les rayures du zèbre repoussent les mouches



Signature sociale, technique de camouflage contre les fauves, dispositif de régulation thermique: de nombreuses pistes ont été explorées sur l'origine des rayures du zèbre. Tim Caro, de l'université de Californie à Davis, défend l'idée qu'elles protégeraient l'équidé contre les assauts... des mouches de la savane africaine, porteuses de nombreuses maladies. Dans une nouvelle étude, il a d'abord comparé les «atterrissages» réussis de mouches sur des zèbres et des chevaux placés côte à côte. Il a constaté que les seconds étaient largement privilégiés par les insectes. Il a ensuite recouvert les chevaux de fines couvertures zébrées: les mouches ont continué à se poser sur leur tête mais beaucoup moins sur leur corps. La preuve que les rayures repoussent les assaillantes, estime-t-il. (PHOTO: TIM CARO/UC DAVIS) > Caro et al., «PLoSone», du 20 février.

MÉDECINE

Le mécanisme de l'insomnie éclairci

Une équipe internationale a éclairci les mécanismes biologiques responsables de l'insomnie, qui affecte de façon chronique 770 millions de personnes dans le monde. L'étude a porté sur l'ADN et les habitudes de sommeil de 1,3 million de personnes, à partir de plusieurs cohortes. 956 gènes dans lesquels des variants contribuent au risque d'insomnie ont été identifiés. Une partie d'entre eux ont un rôle important dans les communications entre neurones, d'autres sont actifs dans des cellules spécifiques de zones du cortex frontal et des noyaux sous-corticaux du cerveau. «L'insomnie, comme tant d'autres troubles neuropsychiatriques, est influencée par des centaines de gènes, chacun de petit effet. Ce qui compte, c'est leur effet combiné», dit Danielle Posthuma (université Vrije, Belgique), qui a coordonné l'étude. > Jansen et al., «Nature Genetics», du 25 février

L'intelligence artificielle, pas si parfaite

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

Mais revenons à nos soucis. En 2013, premier signal d'alarme sur un dysfonctionnement, un an après que le *deep learning* a écrasé tout le monde à une compétition de reconnaissance d'images. Une équipe diverse (Facebook, Google, université de Montréal...) modifie imperceptiblement l'image d'un chien blanc que le système reconnaît comme une... autruche (alors qu'un humain ne voyait même pas le changement)! En 2017, une équipe japonaise a même fait une démonstration en changeant un seul pixel. D'autres exemples trahissent les vices cachés de ces systèmes. Pour distinguer un loup d'un chien, le système se base principalement sur... la couleur du fond tout simplement car il a « appris » qu'il y a plus de loups dans les neiges que de chiens. Ou encore, en 2018, une équipe des universités de York et Toronto s'est amusée à ajouter sommairement un éléphant dans des images et selon sa position, il devenait invisible au système ou était pris pour une chaise. « Ces algorithmes capturent des corrélations curieuses, qui peuvent n'avoir aucun rapport avec la question posée », résume Léon Bottou, du laboratoire d'intelligence artificielle de Facebook. Plus prosaïquement, ils ne comprennent pas ce qu'ils font.

Tromper les algorithmes

Le pire est que ces défauts ne sont pas des bogues mais bien des problèmes intrinsèques. Ces quelques soucis sont devenus plus sérieux lorsque de petits malins y ont vu des façons d'attaquer ces systèmes afin de les tromper, motivant d'autres chercheurs pour inventer des parades. Un nouveau domaine, celui de la sécurité des réseaux de neurones, est né.

Côté « attaque », il est possible d'ausculter les entrailles des algorithmes afin de saisir où passent les « frontières » que cherche à dessiner l'algorithme pour séparer les différentes classes d'objets. Ensuite, on construit une image proche de cette frontière mais dont la modification de quelques pixels la fait basculer de l'autre côté, conduisant à une erreur d'étiquetage.

Mieux, en 2016, une équipe américaine a proposé une « attaque » universelle ne nécessitant pas de connaître les détails de l'algorithme. Il suffit d'observer les « réponses » de la machine pour élaborer un modèle simplifié de la machine visée et construire des images ad hoc la faisant dérailler. « La condition est d'avoir accès au système pour l'interroger, ce qui n'est pas toujours possible », note Nicolas Papernot, l'un des membres de l'équipe, aujourd'hui chez Google Brain, dans un groupe sur la sécurité et la protection des données.

Autre « attaque », en 2017, une équipe académique américaine ajoute des notes adhésives sur un panneau de signalisation et fait prendre à un algorithme un panneau « sens interdit » pour une « vitesse limitée à 50 km/h ». Une équipe de Google, la même année, a dessiné des « autocollants » informes qui, posés à côté d'une banane, la font passer pour un grille-pain. D'autres scénarios d'attaques, plus intrusifs, consistent à s'introduire malicieusement dans la phase d'apprentissage afin de la guider vers de mauvaises réponses.

Côté défense, les parades ont elles aussi fleuri, donnant même lieu à des concours lors de conférences spécialisées. Une stratégie consiste à introduire des exemples « tordus » dans la phase d'apprentissage, pour entraîner le système à se méfier. Il est aussi possible de masquer les mécanismes à l'intérieur du système qui trahissent ce qui se passe aux frontières.

Avec des collègues, Nicolas Papernot a mis en ligne un programme, Cleverhans, qui permet de tester les algorithmes face à diverses attaques et qui propose aussi des parades. Ce chercheur a également élaboré une technique introduisant un peu d'aléas dans les calculs afin que les résultats soient moins dépendants de données particulières. Accessoirement, la méthode est utile pour protéger les données personnelles, car, on l'ignore souvent, la rétro-ingénierie permet de retrouver dans les millions de paramètres des algorithmes des traces des données ayant servi à l'apprentissage. Celles-ci pouvant être très personnelles, on imagine les risques.

« Ce travail sur la sécurité aide aussi à mieux comprendre le fonctionnement de ces algorithmes et leurs limites », indique Nicolas Papernot. Cette difficulté à expliquer comment la machine obtient ses résultats est en effet un autre point négatif du *deep learning*. « Il utilise des critères de ressemblance pour classer, décider... mais cela n'explique pas le classement. Or nous allons donner du pouvoir décisionnel à ces systèmes qui sont en fait des boîtes noires », critique Jean-Michel Loubes, professeur de statistique à l'université de Toulouse.

L'exemple du chien pris pour un loup car c'est en

fait la couleur du fond qui compte montre que ces questions d'« explicabilité » sont importantes. Il ne s'agirait pas d'avoir le même genre de bizarreries pour l'attribution d'un crédit bancaire, une décision de mise en liberté, un recrutement... « Nous sommes un peu en position de faiblesse face à ce type d'intelligence artificielle, qui se présente en outre comme mathématique, donc neutre, objectif... Mais non, il faut s'interroger sur son fonctionnement et le contrôler », indique Jean-Michel Loubes. Ce spécialiste est d'ailleurs membre d'un projet de l'Institut de recherche technologique (IRT) Saint-Exupéry dont une branche s'occupera d'« équité » des algorithmes. Il espère aussi que naîtra à Toulouse l'un des futurs instituts interdisciplinaires d'intelligence artificielle annoncés par le gouvernement, qui aura aussi un tel volet.

Pour « ouvrir » ces boîtes noires, à l'IRT déjà, des outils de visualisations du « cerveau » artificiel permettent de savoir quelles zones de l'écran sont « regardées » par un algorithme jouant au casse-briques, un jeu vidéo assez sommaire. A l'université, Jean-Michel Loubes « stresse » mathématiquement diverses variables pour voir l'effet sur le résultat et ainsi estimer leur rôle dans la décision. Il existe aussi des méthodes pour approcher le résultat complet d'un algorithme très complexe, par des modèles plus simples mais évidemment dans un domaine de validité plus restreint.

La question de la qualité des données

Cette « opacité » n'est pas le seul nuage gris dans le ciel de ces technologies. Les données, qui sont le secret de la réussite de ces systèmes, en sont aussi l'un des points faibles. Leur quantité et leur qualité sont problématiques. Côté quantité, les performances de certains systèmes sont à relativiser au regard de ce qu'ils ont dû ingurgiter. Léon Bottou a par exemple fait des estimations, qu'il a présentées lors d'un exposé le 6 mars 2018 à Sorbonne Université : pour la reconnaissance d'images ou la traduction, il faut plus que ce qu'un humain peut voir ou lire en une vie pour entraîner les algorithmes les plus performants. Pour le jeu de go, c'est plus de parties, au niveau grand maître, que l'humanité entière a jouées... A l'inverse, pour beaucoup de tâches, il n'y a pas assez de données. Alors les chercheurs utilisent ce qu'ils appellent « l'apprentissage de transfert ». On essaie un réseau de neurones qui marche pour une tâche et on espère qu'il ne sera pas mauvais pour une autre...

Mais le « pire » vient de la qualité des données elles-mêmes. Elles peuvent être biaisées, c'est-à-dire déséquilibrées sur certaines variables (origine ethnique, sociale, sexe...). « Avant, on cueillait à la main les données et les biais étaient plus faciles à repérer. On choisissait aussi nous-mêmes les traits

pertinents. Avec l'apprentissage, c'est la machine qui choisit ces traits et cela devient impossible à contrôler », rappelle Nicholas Asher, directeur de recherche CNRS à l'Institut de recherche en informatique de Toulouse et porteur du futur projet d'institut toulousain sur l'intelligence artificielle.

Ces biais, qui déséquilibrent une décision, sont une vraie plaie, vieille comme les statistiques. Ils peuvent exister dans le monde réel (discriminations envers des minorités) et, dans certaines

« IL FAUT S'INTERROGER
SUR LE FONCTIONNEMENT
DE L'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE
ET LE CONTRÔLER »

JEAN-MICHEL LOUBES
STATISTICIEN, UNIVERSITÉ
DE TOULOUSE

REPRODUCTIBILITÉ : L'IA N'ÉCHAPPE PAS À LA CRISE

Un mal qui a atteint déjà plusieurs domaines de recherche est en train de toucher aussi l'apprentissage automatique par réseaux de neurones. Cette maladie, apparue dans les années 2010, a été baptisée du nom de « crise de la reproductibilité » et elle touche le cœur même du processus scientifique, à savoir sa capacité à produire des résultats que d'autres pourront retrouver en suivant le même protocole expérimental. La psychologie, l'oncologie, la biologie, la science du sport... ont pris chacune à leur tour conscience que les méthodes utilisées, notamment statistiques, n'étaient pas des plus rigoureuses, empêchant de retrouver les mêmes résultats.

Depuis deux ans, Joëlle Pineau, professeure à l'université McGill (Montréal) et directrice du laboratoire d'intelligence artificielle de Facebook dans la même ville, invite sa communauté à s'interroger aussi sur ses méthodes et ainsi éviter

la crise. « L'informatique, avec l'apprentissage automatique, devient une science de plus en plus expérimentale. Il faut donc adopter de hauts standards de rigueur méthodologiques », justifie-t-elle.

Garantir la fiabilité

Il y a urgence à garantir la fiabilité et la confiance car son domaine, l'apprentissage par renforcement, s'enrichit de plus de 20 000 articles par an ! A la dernière conférence Neurips, en décembre 2018 à Montréal, elle a commencé à dresser un tableau troublant de son domaine. L'apprentissage par renforcement, qui a permis à l'entreprise Deepmind de battre des champions humains au jeu de go, aux échecs ou à des jeux vidéo, utilise une méthode consistant à explorer les diverses possibilités et à être numériquement « récompensés » en cas de mouvement positif ou à l'inverse « punis ». A la fin du processus, les millions de paramètres

ainsi pondérés produisent des résultats très performants. Mais plus variables que ce qu'on pourrait penser.

Joëlle Pineau a d'abord montré que les performances de divers algorithmes entraînés, dans un simulateur, pour faire avancer un « chien » à deux pattes, une fourmi à quatre pattes ou un « serpent » dépendent des choix de paramètres de l'expérimentateur comme le nombre de neurones, la manière d'attribuer une « récompense »... Selon l'échelle de récompense choisie, les résultats varient du simple au quadruple par exemple. Même l'infrastructure de calcul peut influencer le résultat car ces lourdes simulations demandent parfois de recourir à des processeurs distribués.

Plus étonnant encore. Pour fonctionner, l'apprentissage par renforcement demande que le système explore aléatoirement son « environnement ». Pour générer de l'aléatoire, l'expérimentateur

doit choisir un nombre, qui sert à fabriquer d'autres nombres au hasard. Là aussi, le choix de ce nombre arbitraire modifie les performances...

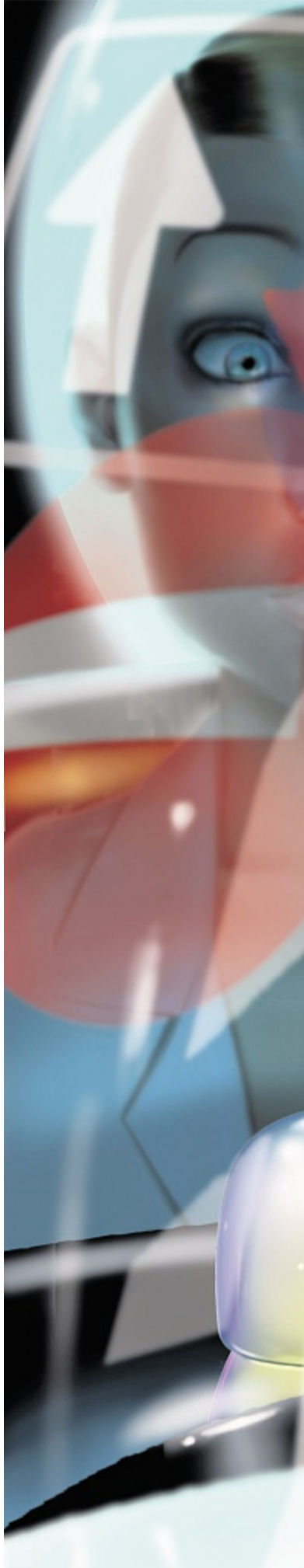
Pour tenir compte de cette variabilité, les informaticiens font tourner plusieurs fois leurs simulations. Mais Joëlle Pineau a remarqué que la plupart choisissaient de le faire seulement... cinq fois (il est vrai que ces calculs sont longs). Il est donc tentant de s'arrêter dès lors que les performances sont meilleures que celles des autres équipes. En oubliant qu'il aurait fallu, en toute rigueur, faire plusieurs autres tentatives et calculer moyennes et écarts-types.

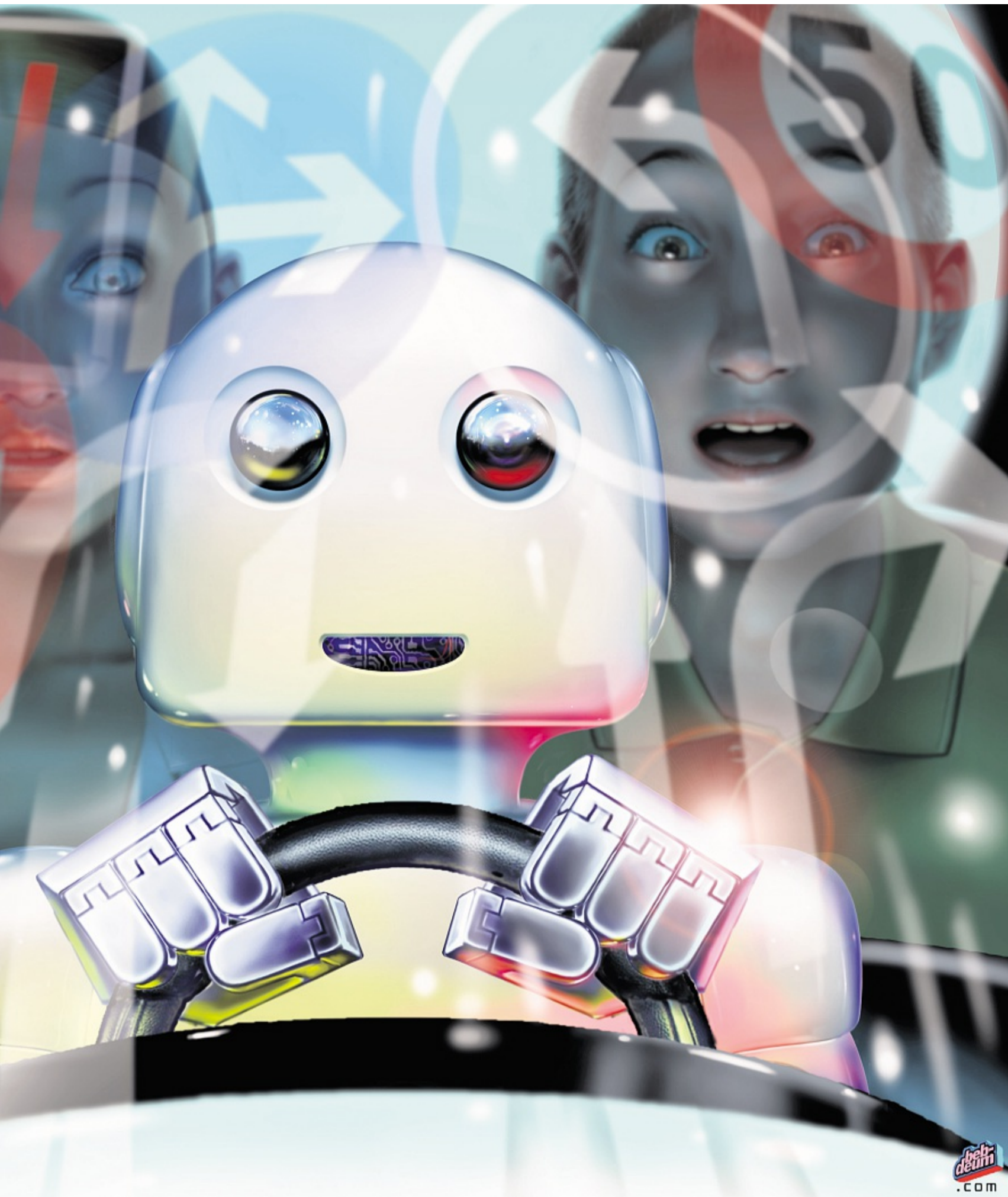
Davantage de rigueur

Joëlle Pineau a pris 50 articles récents et constaté que ces tests statistiques de base ne sont présents que dans trois articles... « Ce n'est pas parce qu'on utilise des ordinateurs qu'on doit être moins rigoureux. On essaie, mais on peut s'emballer pour

des résultats. C'est aux plus expérimentés d'entre nous d'appeler à plus de rigueur », estime la spécialiste.

A la conférence Neurips, elle a d'ailleurs proposé une « liste de courses » à remplir avant de publier un article qui demande à indiquer les barres d'erreur, l'infrastructure utilisée, les tests statistiques... Les organisateurs de la conférence l'ont fait remplir pour tous les articles présentés et les résultats seront publiés prochainement. « Ce qui rassure, c'est que les gens sont ouverts à ces messages sur la reproductibilité. En outre, nos codes informatiques sont souvent mis à disposition, ce qui permet de les faire tester par d'autres. » Pour inciter encore plus à la prise de conscience, elle organise depuis 2017 un défi invitant des chercheurs à reproduire les résultats de leurs collègues. L'apprentissage automatique commence par l'apprentissage de la rigueur par les humains. ■





COMMENT AUTOMATISER L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE ?

C'est l'un des paradoxes de l'intelligence artificielle actuelle : « Dans l'apprentissage automatique, il y a toujours un humain dans la boucle », note Isabelle Guyon, professeure à l'université Paris-Saclay. L'homme doit en effet faire des choix avant de lancer ses machines intelligentes. Il faut d'abord déterminer la bonne méthode d'apprentissage statistique parmi des dizaines : réseaux de neurones bien sûr, avec ou sans renforcement, l'approche dite de *support vector machine* (à la mode avant d'être détrônée par les réseaux de neurones), forêts aléatoires, ou bonne vieille régression linéaire (approcher des relations entre variables par une droite)...

Et si l'on opte pour les fameux réseaux de neurones profonds, il faut choisir le nombre de couches, le nombre de neurones, des paramètres de vitesse d'apprentissage, la connectivité entre couches... « C'est en fait un espace énorme de paramètres et cela devient un des facteurs limitants pour beaucoup de monde », résume Isabelle Guyon. « On fait des allers-retours entre l'intuition et des essais qui peuvent être longs. Les meilleurs sont donc souvent ceux qui ont le plus de puissance de calcul, précise François Fleuret, enseignant-chercheur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne et à l'Institut de recherche Idiap (Lausanne). Ça peut parfois donner l'impression d'un certain gâchis. »

Une idée qui date

Et encore tout ce travail est facilité par le développement et la mise à disposition de kits tout prêts qui permettent en quelques lignes seulement de lancer d'énormes calculs sur des millions de paramètres. Parmi eux, Scikit-learn (pour l'apprentissage sans réseaux de neurones, dits profonds) de l'Inria ou TensorFlow (Google) ou Pytorch (Facebook). Mais si cela réduit les lignes à écrire, cela n'empêche pas de définir « à la main » tous les paramètres de l'algorithme.

D'où l'idée d'automatiser l'apprentissage automatique ! « Cela fait longtemps qu'on a cette idée, depuis le début de ces techniques dans les années 1990-2000 », rappelle Isabelle Guyon. En ce moment, elle prépare même la quatrième édition d'un concours qu'elle proposera avec Chalearn (l'association spécialisée dans les défis qu'elle a créés), Google et l'entreprise chinoise 4Paradigm pour la prochaine conférence-phare du domaine, Neurips, en décembre à Vancouver.

Il y a déjà une cinquantaine de candidats qui soumettront leurs programmes pour en évaluer les performances. Ces codes informatiques devront trouver seuls la meilleure façon de classer des données inconnues, qui pourront être du texte, des images, des vidéos... Pour « entraîner » les algorithmes, une autre série d'images, textes... sera mise à disposition. Parmi les stratégies, certains utilisent un ensemble de règles destinées à choisir les bonnes méthodes en fonction des données, d'autres préfèrent concevoir une architecture complète qui s'adapte à chaque situation.

« On a déjà fait des progrès, mais ce défi sera très dur », prévient Isabelle Guyon, qui est également spécialiste dans la mise au point de ces concours qui permettent à différentes équipes de se mesurer. En 2016 par exemple, une équipe allemande de l'université de Freiburg (Allemagne) a gagné le concours (six tâches sur dix) en automatisant l'utilisation de Scikit-learn. « Ça libère l'utilisateur de tâches fastidieuses et lui permet de se concentrer sur les vrais problèmes », explique la page web d'Auto-sklearn, le nom de ce programme autonome. ■

D. L.

situations, il est souhaitable que les algorithmes corrigent ces défauts. Mais les biais peuvent être aussi dans l'ensemble des données d'apprentissage, auquel cas il convient de les détecter puis de les corriger, soit en modifiant ces données d'entraînement, soit en modifiant l'algorithme afin de « pénaliser » certains cas. « Nous devons alors faire attention à ne pas nuire aux performances tout en surveillant les biais », rappelle Jean-Michel Loubes.

Et puis il y a des biais cachés, c'est-à-dire des variables qui en influencent d'autres sans qu'elles soient explicitement présentes. Une habitude de consommation peut trahir le sexe d'une personne, sans que le genre soit mentionné dans les données.

Compte tenu du lien étroit entre ces questions de biais et les questions éthiques, les principaux acteurs du numérique ont développé des outils qui permettent de jouer avec des données et de corriger des biais comme au sein du groupe PAIR de Google ou chez IBM avec son outil AI Fairness 360.

Pensée trop technicienne

Comme si cela n'était pas assez compliqué, fin janvier, lors d'une conférence sur l'équité à Atlanta, une équipe a douché ces tentatives en pointant qu'elles relèvent d'une pensée trop technicienne et qu'elles risquent de manquer leur cible si elles ne tiennent pas compte du contexte social dans lequel elles s'appliquent. Et de plaider pour une collaboration plus étroite avec les sciences humaines et sociales pour élaborer en commun des règles plus justes.

Ces problèmes de statistique débouchent sur d'autres, tout aussi connus mais qui prennent une coloration nouvelle dans ce contexte d'intelligence artificielle : les corrélations et les causalités. Par définition, les méthodes d'apprentissage fournissent des corrélations, mais, sans effort particulier, ne peuvent dire quelle variable est la cause de quoi. Le piège bien connu est de constater qu'il y a plus de morts à l'hôpital et que donc l'hôpital tue... « Un espoir est que, en tentant de

**« LES HUMAINS ACQUIÈRENT
UNE QUANTITÉ ÉNORME
DE CONNAISSANCES
PAR OBSERVATION. IL FAUT
UN NOUVEAU PARADIGME
QUI PERMETTE AUX
MACHINES D'APPRENDRE
DE LA MÊME MANIÈRE »**

YANN LECUN
FACEBOOK

comprendre cette notion de causalité, on parvient à combler le fossé actuel entre l'intelligence et l'apprentissage automatique », estime Léon Bottou. Après tout, on comprend le monde en liant les causes et leurs effets.

« C'est un projet à long terme pour permettre aux machines de découvrir des relations de causalité leur permettant de prédire et d'agir à bon escient », indique Yann LeCun, autre pionnier du domaine, professeur à l'université de New York et responsable scientifique du laboratoire d'intelligence artificielle de Facebook. Pour Léon Bottou, être capable de comprendre la causalité aiderait ces machines à raisonner, une capacité dont elles sont aujourd'hui dépourvues. Récemment, des collègues de l'université de Tübingen (Allemagne) ont entraîné une machine à reconnaître, dans des paires de variables, laquelle est la cause de l'autre (altitude/température, consommation d'essence/déplacement...). Lui-même a réussi à trouver, dans des images, « des indices qui suggèrent des relations causales, que nos méthodes aujourd'hui ignorent ». Un premier pas.

Mais ce n'est pas la seule stratégie pour devenir plus « intelligent ». Pour Yann LeCun, « les jeunes

animaux et les bébés humains acquièrent une quantité énorme de connaissances, principalement par observation : nous apprenons que le monde est tridimensionnel, qu'il y a des objets qui en cachent d'autres, que les objets non soutenus tombent... Il nous faut un nouveau paradigme qui permettrait aux machines d'apprendre de la même manière ». Concrètement, il s'est lancé dans des modèles prédisant le futur, par exemple la suite d'une séquence vidéo. Cela marche... quelques secondes, avant de devenir flou.

Joëlle Pineau, professeure à l'université McGill (Montréal) qui travaille aussi au laboratoire de Facebook FAIR, a fait sien l'adage rugbystique qui proclame « entraînement difficile, match facile ». Autrement dit, afin d'augmenter les capacités de généralisation des algorithmes, elle leur fait apprendre dans un environnement perturbé. Par exemple, au classique casse-briques, elle ajoute en fond des vidéos qui n'ont rien à voir avec le jeu. L'apprentissage est plus long, plus difficile, mais il sera plus efficace dans des situations inattendues.

Geoffrey Hinton, autre pionnier du domaine, travaille à un changement d'architecture des réseaux de neurones eux-mêmes pour leur faire acquérir une dimension oubliée : les algorithmes actuels identifient les objets sans tenir compte de la position des parties reconnues les unes par rapport aux autres. Son idée de « capsules », remédiant à ce problème et parue en 2017, a déjà été citée plus de cent fois.

Enfin, d'autres rêvent d'enterrer la hache de guerre entre l'apprentissage statistique et les méthodes symboliques, c'est-à-dire l'enchaînement de règles explicites pour construire un raisonnement. La méthode avait eu son heure de gloire dans les années 1970-1980, notamment dans les systèmes experts, avant d'être balayée par les réseaux de neurones. « Mélanger les deux, c'est une bonne idée, évidemment, souligne Léon Bottou. Mais ça veut dire quoi ? Comment fait-on ? Aujourd'hui, on ne sait pas le faire. » ■

DAVID LAROUSSE

LE LIVRE

Expérimentation
quantique

Le physicien Julien Bobroff raconte la mécanique quantique à travers les protocoles qui ont décrit l'infiniment petit

La mécanique quantique est un domaine si compliqué que, lorsque des livres grand public l'abordent, ils mettent souvent tous leurs efforts sur la pédagogie, les grandes figures historiques ou les applications, laissant de côté ce qui pourtant est essentiel : quelles expériences ces chercheurs ont-ils réalisées pour parvenir à construire cette description de l'infiniment petit ?

Il faut donc saluer le pari du physicien Julien Bobroff de nous faire découvrir cette théorie un brin étrange par le biais des expériences-clés qui ont marqué cette histoire. Onze descriptions de protocoles sont présentées, mettant en avant les physiciens et leurs astuces, pour introduire les concepts d'atome, de dualité onde-corpuscule, d'effet tunnel, de quantification... Toutes ces expériences ont donné lieu à des prix Nobel, dont celui du Français Serge Haroche sur la réalisation en 1996 d'un chat de Schrödinger (un concept célèbre illustrant la possibilité pour un objet d'être dans deux états à la fois).

Faire de la physique à la main

Mais ce détour original par la description des instruments et de leurs maîtres n'est pas qu'une astuce de vulgarisation, c'est aussi un moyen de célébrer cette manière de faire de la physique, à la main, qui bien qu'évidente est parfois minorée ou occultée. L'auteur, par ailleurs expérimentateur, est plus que passionné et passionnant pour présenter ses glorieux aînés penchés sur des microscopes, des champs magnétiques, des « thermos » géants... En introduction, il raconte comment il a eu, à 18 ans, le coup de foudre pour cet « espace de liberté, de bricolage et de bidouille » qu'est la science expérimentale. La façon minutieuse et astucieuse dont Jean Perrin, dès le premier chapitre, arrive à « voir » les atomes illustre parfaitement ce qu'il entend par là.

Julien Bobroff ne fait pas non plus dans la facilité dans sa sélection, en n'hésitant pas par exemple à s'intéresser à des expériences aux conclusions compliquées, comme celles sur l'effet Hall quantique ou sur les condensats de Bose-Einstein. Mais, comme les autres chapitres, le talent pédagogique du physicien rend cela digeste.

Sans doute car il est directement lié à sa spécialité, l'un des chapitres les plus réussis décrit la découverte de la supraconductivité par Kamerlingh Onnes en 1911. Tous ces chapitres, parfois trop courts peut-être, décrivent parfaitement les instruments déployés, les périodes de doutes, les déclics qui font que ça marche, la ténacité des physiciens, la compétition (notamment sur l'invention du laser) et aussi les surprises. Certains phénomènes sont ainsi observés mais expliqués au départ avec de mauvaises théories. Le lecteur remarquera aussi un détail peut-être inattendu : dans les nombreuses illustrations, les chercheurs portent très souvent des cravates. ■

DAVID LAROUSSIERE

Mon grand mécano quantique, de Julien Bobroff (Flammarion, 155 pages, 17 euros).

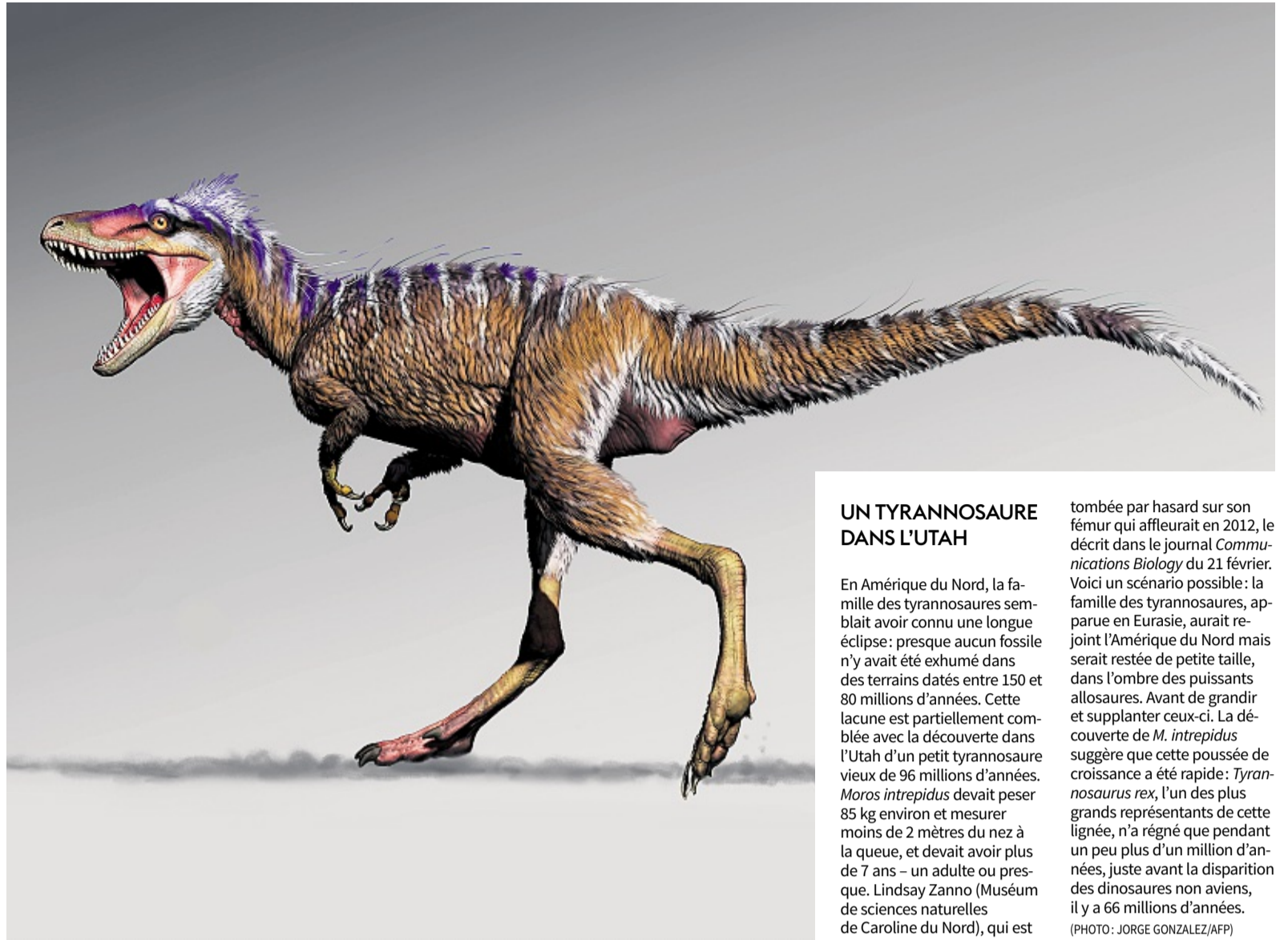
LIVRAISON

LIVRE

« Des Lumières sur le ciel »

Charles a 18 ans et ne va pas bien depuis un moment quand un médecin évoque pour la première fois l'hypothèse d'une schizophrénie. Dans un livre témoignage, sa mère, Bénédicte Chenu, offre un récit sans fard de leur parcours commun, avec les embellies et les rechutes, les rapports parfois exécrables avec le corps médical... Combattante sans relâche pour aider son fils à trouver les meilleures solutions, Bénédicte Chenu s'est aussi engagée publiquement pour améliorer la prise en charge et la représentation de ces maladies, à travers le collectif Schizophrénies.

> De Bénédicte Chenu (éditions Leduc, 190 pages, 17 euros).

UN TYRANOSAURE
DANS L'UTAH

En Amérique du Nord, la famille des tyrannosaures semblait avoir connu une longue éclipse : presque aucun fossile n'y avait été exhumé dans des terrains datés entre 150 et 80 millions d'années. Cette lacune est partiellement comblée avec la découverte dans l'Utah d'un petit tyrannosaure vieux de 96 millions d'années. *Moros intrepidus* devait peser 85 kg environ et mesurer moins de 2 mètres du nez à la queue, et devait avoir plus de 7 ans – un adulte ou presque. Lindsay Zanno (Muséum de sciences naturelles de Caroline du Nord), qui est

tombée par hasard sur son fémur qui affleurait en 2012, le décrit dans le journal *Communications Biology* du 21 février. Voici un scénario possible : la famille des tyrannosaures, apparue en Eurasie, aurait rejoint l'Amérique du Nord mais serait restée de petite taille, dans l'ombre des puissants allosaures. Avant de grandir et supplanter ceux-ci. La découverte de *M. intrepidus* suggère que cette poussée de croissance a été rapide : *Tyrannosaurus rex*, l'un des plus grands représentants de cette lignée, n'a régné que pendant un peu plus d'un million d'années, juste avant la disparition des dinosaures non aviens, il y a 66 millions d'années. (PHOTO : JORGE GONZALEZ/AFP)



DIX MILLE PAS ET PLUS

LE SKI, BON POUR LE CŒUR ET LE MORAL

Par SANDRINE CABUT

Bien sûr, les sports d'hiver peuvent être des activités à risque d'accidents, qu'il faut minimiser par une préparation physique ad hoc, le port d'accessoires de sécurité (casque, protections des poignets pour les surfeurs), et du matériel adapté (réglage correct des fixations pour diminuer la fréquence des entorses de genou)... Mais qu'en est-il de leurs potentiels bienfaits pour la santé ?

Dans ce domaine, et même pour le populaire ski de descente, pratiqué par des millions de personnes dans le monde, les publications scientifiques sont bien moins nombreuses que celles portant sur l'accidentologie. Les rares études, dont celle publiée en 2013 par Martin Bartscher et ses collègues de l'université d'Innsbruck (Autriche) dans la revue *BMC Public Health*, sont en tout cas prometteuses.

Interrogés par questionnaire, près de 1300 skieurs de longue date (971 hommes et 288 femmes), âgés d'une cinquantaine d'années, se révèlent avoir un mode de vie plus sain que la population générale. Ils font davantage d'activité physique aérobie (d'endurance), et consomment moins de tabac et d'alcool. La fréquence de leurs facteurs de risque cardio-vasculaires (tels le diabète, l'hypertension artérielle, l'excès

de cholestérol) est globalement comparable à celle de la population générale. Mais les auteurs de l'étude montrent un effet dose : plus leur pratique du ski (classée en moins de dix jours dans l'année, onze à vingt, ou plus de vingt) est importante, moins ces sportifs sont porteurs de ces facteurs de risque. De même, ceux qui skient le plus souvent dans l'année sont moins exposés que les pratiquants occasionnels au stress et à des troubles de mémoire, des résultats significatifs sur le plan statistique.

Plus récemment, dans une revue de la littérature portant sur 21 études, Martin Bartscher confirme les atouts du ski alpin pour le système cardio-vasculaire et le profil métabolique (*Frontiers in Physiology*, 14 janvier). Les bénéfices sont liés au caractère fractionné de cette activité, qui alterne efforts intenses assez courts et temps de récupération (les remontées !), mais pas seulement. L'hypoxie – diminution de la quantité d'oxygène distribuée aux tissus – intermittente pendant les montées-descentes peut améliorer le contrôle de la glycémie, le profil lipidique et la tolérance à l'effort, écrivent les chercheurs. Ils notent aussi que l'association effort physique-exposition au froid peut stimuler le système mitochondrial, l'usine à énergie des cellules. Leur revue de la littérature suggère bien d'autres effets favorables du ski : sur le sys-

tème musculaire, la densité osseuse, la coordination motrice, l'équilibre... Sans oublier les bienfaits sur le mental, procurés par l'activité physique elle-même et les conditions de sa pratique : en extérieur dans une nature parfois grandiose, cadre familial ou amical. Les Autrichiens soulignent toutefois que ces résultats doivent être interprétés avec précaution, et qu'ils demandent confirmation par d'autres travaux.

Côté accidentologie, le bilan 2017-2018 de l'association Médecins de montagne fait état de 144 050 blessés – dont 87% en ski alpin –, un chiffre en baisse par rapport au début des années 2000. Les débutants sur les pistes sont les plus exposés. Les entorses du genou représentent 31% des blessures à ski, et près de la moitié sont des ruptures du ligament croisé antérieur. « Le risque est multiplié par trois chez les femmes, pour des raisons anatomiques (genoux souvent en X) » indique le docteur Arnaud Cibrario, membre des Médecins de montagne. La prévention passe par un réglage souple des fixations. « Pensez à partir avec de l'eau, la déshydratation augmente le risque de blessure musculo-tendineuse », insiste le médecin. De nombreux conseils de prévention sont en ligne sur le site du ministère des sports, notamment des vidéos de préparation physique et d'échauffement. En piste ! ■

AFFAIRE DE LOGIQUE - N° 1089

Carrés d'as

Dans ce « club des as » de mathématiques, qui compte 24 membres, on prépare une grande compétition par paires. Lors de chaque entraînement, quand un nombre N de paires est présent (N est donc inférieure ou égale à 12), le président du club pose sur une table des dossards allant de 1 à $2N$ parmi lesquels chacun doit choisir le sien et l'accrocher dans son dos. Mais il demande qu'une condition soit, si possible, respectée : la somme des dossards de deux partenaires doit être un carré parfait.

1. Pour quelles valeurs de N la condition du président peut-elle être remplie par toutes les paires ?

Quelques semaines plus tard, un gigantesque entraînement réunit tous les clubs des as de la région. Les paires participantes (il y en a un nombre M multiple de 4), reçoivent, cette fois encore, des dossards allant de 1 à $2M$.

2. Pourront-elles toutes, quel que soit M , porter des dossards dont le total est un carré parfait ?

SEMAINE DES MATHÉMATIQUES
PRÉLUDE À STRASBOURG ET VARCES

La huitième semaine des mathématiques a lieu cette année du 11 au 17 mars sur le thème « Jouons aux mathématiques ». Les initiatives, nombreuses, ne se limitent pas au domaine scolaire. Elles s'étendent aux parents et au grand public. Sélection, tout d'abord, d'entrées en matière.

• **A Strasbourg**, le 06/03 à 14h, Aurélien Alvarez donnera à l'IRMA une conférence (« Expérimentons les maths »), illustrant pourquoi on comprend mieux les objets mathématiques en les construisant soi-même. Dans la même ville, au « Vaisseau », se tiendra le 4 mars, de 16 h à 22 h, une « nuit des jeux mathématiques » à destination des professeurs des écoles et des collégiés.

• **A Varcès**, en Isère, salle de l'Oriel, pour la troisième édition de « Maths à l'Oriel », le 10/03 à 15h, la Grange des maths propose une conférence de J-B. Aubin sur le thème « Mathématiques et magie », et à 16h, un goûter et une séance de jeux pour tous.

SEMAINE DES MATHÉMATIQUES (1)
LES ÉVÉNEMENTS DU 11 AU 17/03

• **A Maubeuge** (59), du 12 au 16/03, la Cité des Géométries lance cette année, dans la Salle Sthrau et dans la médiathèque, le premier Salon des jeux mathématiques en Val de Sambre pour offrir une image vivante et attractive des mathématiques. Elle propose en outre des ateliers de jeux mathématiques, de découverte de l'origami et d'initiation au codage.

• **A Saint Briec** (22), du 11 au 17/03, l'association « Le temps des sciences » organise le festival « La preuve par neuf », parrainé par l'Oulipo et le magazine *Tangente*. La Maison Louis Guilloux (13, rue Lavoisier) accueillera toute la semaine l'exposition « Bulles au carré » ainsi que, le 12 mars, un spectacle de jonglerie mathématique. A la Bibliothèque municipale André-Malraux, le 13 mars, une table ronde autour de la littérature mathématique (suivie d'une séance de signatures) rassemblera Anne Boyé, Gilles Cohen et Daniel Lignon. Michèle Audin fait une conférence le 15 et anime le 16 un atelier d'écriture sous contraintes. Enfin, le 16, la FFIJ organise un concours de jeux mathématiques et littéraires. Informations : www.letempsdessciences.fr

Solution du problème 1088

Si chacun joue au mieux, l'aire du triangle rouge sera, à la fin du jeu, 25 cm².

• On montre d'abord qu'Alice peut toujours s'arranger pour que l'aire du triangle soit au moins 25 cm². Pour cela, elle choisit au départ pour P le milieu I de [BC].

- Si Bob choisit le milieu J de AC, l'aire de PQR sera 25 cm² puisque [IJ] est parallèle à [AB] et de longueur moitié.

- Si Bob choisit Q ailleurs, par exemple plus près de A que de C, Alice choisira R plus près de B que de A. Si K est le milieu de [AB], l'aire de PQR sera plus grande que celle de PQR, puisque ces triangles ont une base commune et que la hauteur relative à K est plus petite que la hauteur relative à R. L'aire de PQR sera donc plus grande que 25 cm².

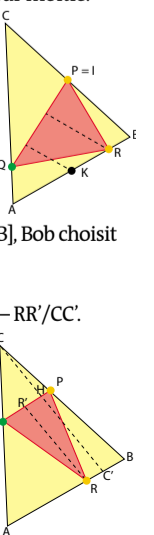
• Si le choix d'Alice est un autre point P de [AB], Bob choisit Q sur [AC] tel que (PQ) soit parallèle à (AB).

Avec les notations de la figure, on a alors : $CP/CB = PQ/AB = CH/CC' = (CC' - RR')/CC' = 1 - RR'/CC'$.

En appelant x le rapport CP/CB , on a :

$$RR' = (1-x) \times CC'. \text{ Ainsi, } \text{aire}(PQR) = (PQ \times RR')/2 = x(1-x) \times \text{aire}(ABC).$$

La fonction $x(1-x)$ prenant son maximum (égal à 1/4) pour $x = 1/2$, l'aire de PQR est inférieure à 25 cm².



CARTE
BLANCHELe retour à l'école
des mathématiciens

Par ÉTIENNE GHYS

Ça va bouger dans le petit monde des mathématiques ! A l'occasion du 80^e anniversaire du CNRS, l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions a proposé à Jean-Michel Blanquer que l'année 2019-2020 soit déclarée « Année des mathématiques ». Le ministre a accepté l'offre et l'événement sera inauguré le 2 octobre 2019 dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne. Quand on y songe, il s'agit d'une petite révolution : les chercheurs en mathématiques, traditionnellement cantonnés dans leur tour d'ivoire, vont tenter d'entrer en contact avec le monde enseignant. Un certain nombre de sous-communautés n'interagissent en effet que très peu : enseignants-chercheurs du supérieur, enseignants du secondaire et enseignants du primaire.

L'année 2018 a vu la publication d'un rapport Torossian-Villani proposant « 21 mesures pour l'enseignement des mathématiques ». Ces mesures sont plus ou moins consensuelles, mais il reste à les mettre en pratique et cette Année des mathématiques voudrait aller dans ce sens. Le rapport est ambitieux : « Il s'agit d'améliorer l'image des mathématiques dans la société, de faire baisser la dimension de crainte, voire de souffrance, bref de réconcilier les Français avec les mathématiques. » Cela ne va pas être facile, mais l'enthousiasme des organisateurs, réunis mercredi 19 février à Lyon, est à la mesure de l'enjeu. Heureusement, on ne part pas de zéro. Par exemple, depuis plus de vingt ans, la fondation La Main à la pâte développe des pédagogies, dites « d'investigation », pour l'enseignement des sciences au primaire et au lycée, et s'intéresse depuis peu aux mathématiques.

Création de 200 « labo-maths »

Voici quelques exemples de projets qui devraient être réalisés pendant cette année.

Tout d'abord, en ce qui concerne le primaire, la difficulté majeure est qu'une large majorité des professeurs des écoles n'ont pas bénéficié d'une véritable formation scientifique. Le ministère annonce la mise en place en 2019 de 1000 référents mathématiques. Il s'agira d'enseignants spécialement formés pour accompagner dans chaque circonscription les professeurs des écoles qui seraient sujets à la crainte ou à la souffrance évoquées plus haut.

Le CNRS va encourager, probablement avec force, chacun de ses 41 laboratoires de mathématiques à organiser des journées de formation dans leurs locaux pour les enseignants de collège et de lycée. Il s'agira d'ateliers ou de conférences présentant des domaines de recherche actuels et proposant des transpositions possibles dans les classes, illustrant la formidable vivacité des mathématiques contemporaines, si peu présente dans les manuels scolaires. Ce n'est pas une idée complètement neuve, car les instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques fonctionnent de cette manière depuis cinquante ans, mais il s'agit de passer à une vitesse supérieure.

Le grand mathématicien Emile Borel en avait rêvé au début du XX^e siècle : équiper les lycées de laboratoires de mathématiques, au sein desquels les élèves pourraient manipuler, créer, ou modéliser des objets mathématiques. Ce rêve avait été ravivé il y a vingt ans par Jean-Pierre Kahane, décédé récemment. L'année 2019 verra la création et le financement par le ministère de 200 de ces « labo-maths ». C'est un début significatif, même s'il est modeste, car on compte plus de 4000 lycées en France. Il faudra s'assurer que les financements continueront. Ces laboratoires seront des lieux où les enseignants pourront actualiser leur formation, par exemple à l'occasion de visites de chercheurs venus leur présenter des travaux récents. Il était temps qu'un certain nombre d'entre eux remettent les pieds sur Terre, au contact de la « vraie vie », c'est-à-dire dans des lycées. Je connais plusieurs de mes collègues à qui ce contact avec la réalité fera le plus grand bien. ■

Étienne Ghys

Mathématicien, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, directeur de recherche (CNRS) à l'ENS Lyon.
etienne.ghys@ens-lyon.fr

Greffe de foie : il y a des solutions
pour répondre à la pénurie

TRIBUNE - Des spécialistes recommandent de développer les transplantations de foie partiel et d'utiliser des machines dites de perfusion pour aider à sélectionner les organes

La transplantation hépatique est le traitement essentiel des maladies du foie à un stade avancé ainsi que des cancers localisés au foie. L'Agence de biomédecine (ABM), qui est chargée de l'allocation des greffons hépatiques, nous alerte, par la voix du Pr Olivier Bastien, sur une diminution des dons d'organes dans un article du *Monde* du 2 octobre 2018, alors qu'il n'existe pas d'augmentation du taux de refus au prélèvement en France.

L'aggravation de la pénurie d'organes est liée à deux progrès heureux : la diminution du nombre d'accidents de la route et les innovations dans la prise en charge des accidents vasculaires cérébraux, qui ont pour conséquences une diminution du nombre et une augmentation de l'âge des patients en mort cérébrale susceptibles d'être donneurs d'organes. Devant cette pénurie d'organes, nous, transplantateurs hépatiques, sommes conduits à greffer des organes de moins bonne qualité et/ou provenant de donneurs de plus en plus âgés.

Depuis 2014, le prélèvement d'organes chez des donneurs après arrêt cardiocirculatoire en situation programmée est autorisé en France. Cette modalité dite « Maastricht 3 » consiste à prélever des organes (foie, reins et poumons) chez des personnes en réanimation pour lesquelles un arrêt des soins est acté par la famille et le corps médical. L'ABM a mis en place un protocole pour encadrer rigoureusement cette pratique. Cette modalité de prélèvement concerne plus de 50 % des cas des greffons hépatiques en Angleterre

ou aux Pays-Bas, mais seulement 5 % des transplantations hépatiques en France en 2018. Cette technique, qui demande un investissement important des équipes de réanimation, n'a permis de réaliser que 50 transplantations hépatiques en 2017 sur un total de 1372. En 2018, les chiffres sont similaires.

Même s'il faut évidemment continuer à encourager nos collègues réanimateurs et augmenter le nombre de centres où le prélèvement « Maastricht 3 » est autorisé en France, il est nécessaire d'évaluer d'autres pistes. Il faut apporter une réponse chirurgicale innovante aux circonstances qui ont fait diminuer le don d'organes. Ces solutions existent, on les connaît, c'est la transplantation de foie partiel et l'utilisation des machines de perfusion.

La transplantation de foie partiel permet de greffer deux personnes avec un seul organe séparé en deux parties ou de transplanter un malade avec un héli-foie issu d'un don du vivant. C'est la modalité de transplantation hépatique principale en Asie, alors qu'elle représente moins de 5 % des cas en Europe. Si le risque que représentait le prélèvement de foie chez un donneur il y a dix ans pouvait expliquer les réticences de l'ABM à promouvoir cette solution, la situation actuelle impose de reconsidérer cette attitude.

Aujourd'hui le don du vivant, en particulier de la partie gauche du foie, peut s'effectuer par voie mini-invasive (cœlioscopie) avec des suites opératoires moins lourdes que le prélèvement

LES GREFFONS
HÉPATIQUES
RÉSULTANT D'UN
PARTAGE DE FOIE
ISSU D'UN DONNEUR
DÉCÉDÉ OU D'UN
DON DU VIVANT NE
DOIVENT PLUS ÊTRE
ANECDOTIQUES
EN FRANCE

par voie ouverte qui était la règle jusqu'à présent. Aujourd'hui, nous avons amélioré nos techniques chirurgicales et appris à mieux sélectionner les donneurs. Les greffons hépatiques résultant d'un partage de foie issu d'un donneur décédé ou d'un don du vivant ne doivent plus être anecdotiques en France.

L'autre réponse à la pénurie d'organes est l'utilisation de machines de perfusion qui permettent de sélectionner les organes prélevés avant de les transplanter. Ce sont des machines sur lesquelles on perfuse un greffon avec du sang oxygéné afin d'évaluer son fonctionnement. Pendant huit heures de perfusion, ces machines permettent d'évaluer la fonction de foies dits « limites », en particulier des foies « gras », dits stéatosiques. Cette période sert aussi à sélectionner le receveur ayant le morphotype et l'âge le plus adaptés. Ces machines diminuent de

moitié le nombre de greffons considérés comme non utilisables et non greffés, comme rapporté en 2018 dans la revue *Nature*. Le financement de ces machines est actuellement le seul facteur limitant, mais le nombre de transplantations qu'elles peuvent apporter en plus justifie une politique volontariste en France à l'instar de celles menées par d'autres pays européens.

L'ABM a répondu à la pénurie de greffons avec la promotion du « Maastricht 3 » auprès des réanimateurs. Les résultats récents des transplantations hépatiques adultes à partir d'un héli-foie issu d'un don du vivant et la possibilité d'augmenter le nombre de greffons hépatiques transplantés par l'utilisation de machines de perfusion devraient conduire l'ABM à encourager et financer ces solutions.

L'énergie que nous déployons pour proposer des solutions à nos malades repose sur le rapport singulier qui existe entre l'équipe soignante et ses patients en attente d'une greffe hépatique. Utilisons cette énergie ! En 2017, 170 personnes sont décédées sur la liste d'attente de transplantation hépatique. ■

Pr Eric Vibert, Pr Daniel Cherqui, Pr Cyrille Feray, Pr Antonio Sa Cunha, Pr Didier Samuel, Pr René Adam, du Centre hépato-biliaire de l'hôpital Paul-Brousse, à Villejuif (AP-HP, hôpitaux universitaires Paris-Sud, université Paris-Sud).

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

COLLECTION « ATLAS DU COSMOS »

Les brumes de Jupiter
se dissipent

Observée uniquement à distance, une planète peut longtemps dissimuler les secrets de son intimité. C'est particulièrement vrai pour Jupiter, dont les fameuses « bandes » et « zones » colorées, pourtant clairement visibles sur les images, défient depuis quarante ans l'intelligence des chercheurs. Ces structures latitudinales qui se manifestent sous la forme de brumes d'ammoniac circulant à haute altitude, en sens opposés et à différentes vitesses, sont-elles superficielles, limitées à la couche la plus externe de l'astre ? Ou sont-elles liées à des mouvements survenant loin en dessous de la surface ?

L'un des grands mérites de la mission Juno est d'avoir apporté un début de réponse à cette question. Dans trois articles parus au mois de mars 2018 dans la revue *Nature*, une équipe internationale explique comment elle a pu, à partir des mesures gravimétriques réalisées par cette sonde de la NASA, calculer jusqu'à quelle profondeur s'étendent ces régions venteuses. Pas moins de 3000 kilomètres !

Malgré les multiples missions spatiales qui l'ont visitée, Jupiter, la plus grande des planètes du Système solaire, reste mal connue. La genèse, la structure interne, l'origine du champ magnétique intense ou des tempêtes de cet astre constitué à 90 % d'hydrogène et d'hélium sont encore très mystérieuses.

Juno a la lourde tâche de combler certaines de ces lacunes. Cet engin spatial va parcourir d'ici à 2021 une série de 34 orbites qui le fera passer tous les 53 jours à 4000 km au-dessus des régions équatoriales de la planète. Jupiter tournant sur elle-même en dix heures environ, ces révolutions successives doivent lui permettre de balayer l'ensemble de la surface

de l'astre. En particulier ses pôles, dont les caractéristiques sont largement ignorées.

Depuis son arrivée sur place en juillet 2016, le vaisseau a ainsi permis plusieurs découvertes. Grâce à ses instruments de bord, les astronomes ont mis en évidence de surprenantes variations de la concentration d'ammoniac en fonction des latitudes. Ils ont aussi démontré qu'à l'inverse de ce qui se passe sur Terre, sur Jupiter les nuages d'eau produisent moins fréquemment des éclairs dans les régions équatoriales qu'ailleurs. Enfin, ils ont établi que la « grande tache rouge » s'étend en profondeur sur 300 km au minimum et ont mesuré le champ magnétique jovien qui s'avère avoir des propriétés différentes selon l'hémisphère considéré.

Champ de gravité asymétrique

Surtout, en relevant les accélérations subies par la sonde au cours de ses survols, ils ont pu dresser la première carte de haute précision du champ de gravité de la planète. C'est en analysant cette dernière que des chercheurs ont réussi à estimer la profondeur des « bandes » et des « zones ». « En effet, les données de Juno ont révélé que le champ de gravité jovien présente une asymétrie », explique Tristan Guillot, directeur de recherche CNRS à l'Observatoire de la Côte d'Azur et premier auteur d'une des études publiées par *Nature*. Il n'est pas le même dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud. Et cela est surprenant car Jupiter est une planète fluide : elle n'a ni surface solide ni océan. »

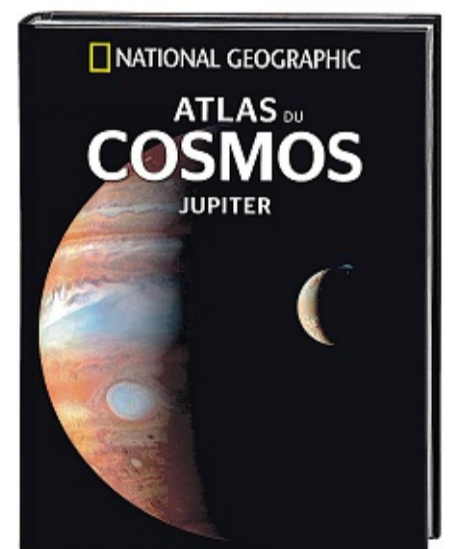
Les astronomes ayant depuis longtemps constaté des différences de régimes de vent entre les bandes nordiques et sudistes, cela pouvait laisser supposer que ces dernières

mettaient en mouvement des masses d'atmosphère significatives. Suffisantes pour expliquer le signal gravimétrique observé. Une hypothèse que ces scientifiques ont vérifiée en recourant à des simulations numériques, aboutissant donc, par deux méthodes indépendantes l'une de l'autre, à une valeur pour leur épaisseur de 3000 km.

Selon ces chercheurs, le chiffre correspondrait à la profondeur au-delà de laquelle, la pression et la température augmentant, l'hydrogène dont est essentiellement fait Jupiter se transformerait en une sorte de plasma fait d'électrons et de protons. Piégées par le champ magnétique intense de la planète, ces particules généreraient des forces de traînée qui s'opposeraient au mouvement des vents. Supprimant à un certain niveau en dessous de la surface « bandes » et « zones ». Et faisant tourner le cœur de la planète de manière uniforme. Telle une gigantesque toupie jovienne. ■

VAHÉ TER MINASSIAN

Pour accompagner la collection « Atlas du cosmos », chaque semaine, état des lieux d'une thématique de recherche.



9,99 €, en vente dès le mercredi 27 février

« D'après notre modèle, le marché financier réel n'est pas très loin du point critique »

ENTRETIEN - Titulaire d'une nouvelle chaire à Polytechnique consacrée à l'éconophysique, Michael Benzaquen s'appuie sur les lois de la physique pour cerner celles de l'économie

Connaissiez-vous l'éconophysique ? Le 18 février, une chaire consacrée à cette discipline intrigante était lancée par l'École polytechnique, avec la société Capital Fund Management (CFM) de gestion de portefeuilles. L'éconophysique, ou comment comprendre la dynamique des systèmes économiques en s'aidant de la démarche des physiciens, experts des systèmes complexes.

Pour mieux saisir cette approche, revenons trente ans en arrière. Le 19 octobre 1987, la Bourse de New York subissait le pire krach de son histoire. « L'indice Dow Jones a chuté de 22,6%, remettant brutalement en cause plusieurs dogmes de l'économie et de la finance théoriques », raconte Jean-Philippe Bouchaud, physicien, président et directeur de la recherche de CFM – un des pionniers de l'éconophysique. Fait stupéfiant : hormis le fameux krach, ce jour funeste n'a été marqué par aucun événement notable. La nature apparemment endogène de cet effondrement « heurtait de plein fouet le mythe des "marchés efficients" », c'est-à-dire rationnels. Par contraste, « elle résonnait avec la phénoménologie des systèmes complexes étudiés par les physiciens ».

Ironie de l'histoire, quelques semaines plus tôt se tenait une singulière rencontre au sommet. À l'invitation de deux experts de renom, l'économiste Kenneth Arrow et le physicien Philip Anderson, elle réunissait à Santa Fe (Etats-Unis) un petit noyau d'économistes, de physiciens, de biologistes et d'informaticiens. « On fait souvent remonter la naissance de l'éconophysique à cette conférence de 1987 », dit Jean-Philippe Bouchaud.

Les progrès spectaculaires réalisés dans la physique des systèmes complexes (fluides turbulents, verres de spin...), depuis les années 1970, se prêtaient au rapprochement de l'économie et de la physique, qui semble connaître aujourd'hui un succès grandissant. Rencontre avec Michael Benzaquen, directeur de cette nouvelle chaire, chercheur CNRS au Laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique, où il est aussi professeur affilié au département d'économie.

Pourquoi est-ce le « bon moment » pour lancer cette chaire ?

En éconophysique, la réalité est d'abord transcrite en modèles mathématiques. Ces modèles conduisent à des prédictions qui sont ensuite confrontées à la réalité. Aujourd'hui, les données massives issues des marchés financiers nous offrent un terrain de jeu d'une puissance et d'une précision inégalées pour tester ces modèles. Les rapprochements féconds entre économistes et physiciens germent d'ailleurs un peu partout, notamment en Italie et au Royaume-Uni. Et cette approche attire de nombreux étudiants.

Les modèles classiques peinent à décrire la complexité du monde socio-économique. Pour quelles raisons ?

Dans ces modèles classiques, les systèmes économiques sont supposés linéaires : une petite cause produit toujours un petit effet, une grande cause un grand effet. On fait comme si ces systèmes étaient toujours à l'équilibre. De plus, les agents qui interviennent sont jugés infiniment rationnels, homogènes, toujours bien informés et indépendants (l'environnement ne les atteint pas). Ce concept « d'agent représentatif » est très confortable : il permet d'extrapoler d'une intelligence individuelle à une intelligence collective. Mais la réalité contredit ces élégants modèles mathématiques. Quand leurs prédictions sont confrontées aux big data des marchés financiers, ça ne marche pas ! Certes, la crise de 2008 a entraîné une prise de conscience des insuffisances de ces modèles. Nombreux sont pourtant les mathématiciens et les économistes qui ne veulent pas les lâcher.

Comment mieux modéliser la complexité du monde économique ?

Il faut tenir compte de cette complexité. Les systèmes économiques sont fortement non linéaires : de petites causes peuvent produire des effets dramatiques, comme des krachs financiers. C'est « l'effet papillon » – le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut provoquer une tornade au Texas. De plus, ces systèmes sont souvent instables, hors d'équilibre. Cela évoque les transitions de phase qui se produisent dans les milieux complexes. Un changement minime de température peut soudain transformer une piscine en bloc de glace. De même, un tout petit changement sur un taux d'intérêt peut faire basculer dans un régime de crise. Autre difficulté : les agents qui interviennent dans le

monde économique sont irrationnels, hétérogènes et partiellement informés. Ils sont aussi très connectés et influencés les uns par les autres. C'est évidemment moins confortable.

« *More is different* », relevait Philip Anderson, Prix Nobel de physique en 1977. « Plus », ce n'est pas juste la somme de comportements individuels : c'est l'émergence d'un comportement collectif différent. Comment une nuée de 10 000 étourneaux change-t-elle brusquement de direction, sans leader à sa tête ? Relier les comportements microscopiques (individuels) aux comportements macroscopiques (collectifs) : telle est la raison d'être de la physique statistique. Et de l'éconophysique.

L'éconophysique pourrait-elle prévoir des krachs financiers aux effets dévastateurs ?

Il serait prétentieux de l'affirmer, mais c'est un espoir. Prenons l'exemple d'une crise de liquidité, ou *flash crash* [« krach éclair »]. Une telle crise survient lorsque le carnet d'ordres de vente d'un produit se vide en quelques instants. Plus personne ne veut ni acheter ni vendre. Plus personne ne sait ce que vaut un produit. Il s'ensuit un effet d'avalanche sur tout le marché.

Le 6 mai 2010, a eu lieu le plus gros *flash crash* de la décennie. En quelques minutes, tout le marché américain a perdu 10% à 20% de sa valeur. Que s'est-il passé ? Aujourd'hui encore, rien ne l'explique. Ce n'est ni à la suite d'une déclaration fracassante de Donald Trump ni à cause du Brexit ou de tout autre événement extérieur. On sait que 90% à 95% des variations de prix, sur les marchés, ne sont pas liées à un événement externe. Presque toujours, ces crises de liquidité sont de nature endogène.

Sur ce problème des crises de liquidité, comment intervenez-vous ?

Un de mes étudiants, Antoine Fosset, démarre une thèse sur le sujet. Jusqu'ici, les modèles classiques, pour la dynamique du carnet d'ordres, utilisent des taux constants d'événements (dépositions, annulation...). Nous testons un nouveau modèle qui rend ces taux dépendant du passé : il intègre des boucles de rétroaction pour rendre compte des comportements des agents. Le taux d'annulation des ordres, par exemple, augmente si le prix passé a beaucoup fluctué.

Avec ce modèle, nous sommes parvenus à mettre en avant une transition de phase. En dessous d'une certaine intensité de rétroaction, tout est stable. Mais dès qu'un certain seuil (« point critique ») est franchi, des crises de liquidité se produisent à répétition. Nous avons calibré ce modèle sur les données du marché. Et passé beaucoup de temps à vérifier qu'il colle avec les données réelles. Puis nous nous sommes interrogés : dans quel régime se situe le

marché réel ? Eh bien, il se trouve du côté du régime stable, mais pas très loin du point critique. À cause des fluctuations et de l'hétérogénéité inhérentes aux systèmes complexes, il bascule parfois dans un régime de crise.

Vous citez un problème d'apparence triviale en macroéconomie : comment trouver le meilleur restaurant de Paris ?

En théorie, pour trouver le « meilleur restaurant » de cuisine traditionnelle à Paris, il faudrait avoir testé les 5738 établissements de la ville. Chose impossible, ou il faudrait dix ans. Entre-temps, les chefs auront changé, des enseignes auront disparu... On est ici en permanence dans un état hors d'équilibre. Dans la réalité, tout le monde se coince dans un « maximum local d'utilité ». Et l'on s'autopersuade que ce choix est le meilleur pour nous.

Autre exemple : les réseaux d'entreprises...

Ici, l'enjeu est d'analyser les réseaux interentreprises sur les marchés internationaux. Isabelle Méjean, professeure associée d'économie à l'École polytechnique, se consacre à ces questions complexes. Ces vingt dernières années, on a assisté à une accélération très forte de la fragmentation des organisations productives, de plus en plus complexes et internationales – avec leurs réseaux étendus de fournisseurs et de sous-traitants. La firme Boeing en offre un exemple frappant. Quelles sont – selon leur taille et leurs réseaux – les firmes les plus résilientes ou les plus vulnérables, face aux chocs et aux crises ? Les outils de la théorie des graphes et des réseaux aident à appréhender ces questions. L'impact est évidemment crucial, en termes de conduite optimale des entreprises. Mais une grande difficulté, en macroéconomie, est de récolter des données pertinentes pour tester nos modèles.

Une crise comme la faillite de Lehman Brothers, qui, en 2008, a précipité dans la misère des millions de foyers modestes, pourrait-elle se reproduire ?

Il existe toujours une hypermathématisation des produits financiers qui permet de masquer le risque. Peut-être y a-t-il un peu moins de produits dérivés. Mais, sur le fond, aucun changement satisfaisant n'a été opéré. Et puis les banques centrales continuent d'utiliser le concept « d'agent représentatif » (un foyer, une société...) – homogène, rationnel et bien informé, indépendant. C'est effrayant de voir comment les hypothèses utilisées pour faciliter la construction des modèles mathématiques sont irréalistes ! Le problème est qu'on a beaucoup trop fait confiance à ces modèles. ■

MODÈLES RECUEILLIS PAR
FLORENCE ROSIER



ZOOLOGIE

Une limace scotchante

Qui n'a pas rencontré le mucus de la limace ? Qui n'a pas été saisi d'un haut-le-cœur en marchant dans cet amas visqueux ou en le touchant par accident ? Les enfants crient, les adultes frissonnent, les chiens aboient. Il faut être malacologue, le doux nom donné aux spécialistes des mollusques, pour rester de marbre, les mains dans la gluante sécrétion.

Doctorant à l'université de Newcastle, en Australie, John Gould ne fait pas partie de cette petite communauté. Ses bestioles de prédilection seraient plutôt les amphibiens, plus particulièrement les « grenouilles papier de verre » (*Lechriodus fletcheri*), ainsi nommées en référence à la texture de leur dos brun. Il y consacre même sa thèse. Et c'est en pistant l'une d'elles, à la fin d'une nuit pluvieuse, dans une forêt de Nouvelle-Galles du Sud, que le jeune naturaliste est tombé en arrêt devant une drôle de scène. « Il y avait une grenouille verte immobile. J'ai d'abord pensé qu'elle était coincée entre deux branches d'*Eucalyptus*, avant de découvrir qu'elle était en réalité collée. Je n'avais jamais vu ça. Inexplicable. C'est en prenant une photo que j'ai vu la limace, juste à côté... J'ai tout de suite fait le lien. »

Pas évident pourtant. Car, chez ces mollusques, le mucus sert à bien d'autres choses : à faciliter les déplacements, à réguler l'humidité corporelle ou encore à soutenir leurs interminables et spectaculaires accouplements. La substance gluante devient bien parfois une arme défensive contre certains carabes, mais elle vient alors encombrer les mandibules du coléoptère. Pas l'immobiliser.

Ici, la grenouille découverte apparaissait pieds et poings liés, si l'on peut dire. « Les pattes avant étaient collées ensemble, le corps et les pattes arrière étaient fixés à l'*Eucalyptus*, décrit John Gould. Pour la rapporter, nous avons découpé la branche. »

De retour au laboratoire avec quelques spécimens de limaces à triangle rouge (*Triboniphorus graeffei*) dans sa besace, l'étudiant a d'abord ouvert les livres et constaté que certaines salamandres, les concombres de mer et... deux autres espèces de limaces produisaient pareil mucus collant pour se défendre. Il s'est ensuite occupé de la malheureuse victime, qui, vingt-quatre heures plus tard, restait désespérément prisonnière, en retirant la surface de l'écorce. Enfin, il a gratté les limaces rapportées et découvert que leur toucher le dos déclenchait immédiatement la production de gouttelettes d'un liquide d'abord visqueux, puis rapidement très adhésif : le fameux mucus collant.

S'il s'avoue impressionné par l'observation, publiée sur le site de preprint *bioRxiv*, Xavier Cucherat, malacologue indépendant et fondateur du bureau d'étude Arion.idé, regrette l'absence de tests en laboratoire mettant aux prises limaces et batraciens. « Peut-



Limace à triangle rouge. VICKI ELLIOTT/AUSTRALIAN MUSEUM

être que la grenouille n'était pas prédatrice, elle passait juste au mauvais endroit au mauvais moment, imagine-t-il. Les ennemis des limaces, ce sont plutôt les oiseaux nocturnes, les hérissons et les coléoptères, rarement les grenouilles. » « Sauf ici, réplique John Gould. Chez nous, elles mangent tout. Alors, certes, nous n'avons pas la preuve que cette première observation, à l'état naturel, d'un animal pris au piège du mucus d'une limace est bien le résultat d'une interaction proie/prédateur. Mais c'est plus que probable. »

Le jeune biologiste n'en a pas fini avec les limaces. L'appétit venant en mangeant, il rêve désormais de décrypter les mécanismes de sécrétion du mucus, et de comprendre l'origine de ses propriétés adhésives. L'enjeu est scientifique, mais aussi industriel. John Gould a en effet observé que le mucus perdait son pouvoir adhésif à l'air libre au bout de quarante-huit heures, et qu'il le retrouvait au seul contact de l'eau. « Une colle conservée au sec et réactivée dans un milieu liquide, c'est exactement ce que la chirurgie recherche », résume-t-il. Bientôt de la bave de limace dans le corps ? Les enfants vont adorer. ■

NATHANIEL HERZBERG