science & médecine
Le Monde

L'urgence traumatique en première ligne

A Orlando (Floride), les secours s'organisent pendant l'attaque contre le Pulse, le 12 juin.
PHELAN M. EBENHACK/AP

A Orlando comme à Paris, les attentats ont montré l'efficacité des « trauma centers ». Cette organisation des soins inventée aux Etats-Unis pour faire face aux blessures lourdes est adoptée par des hôpitaux français

NICOLAS BOURCIER (À ORLANDO), SANDRINE CABUT ET PASCALE SANTI

La nuit s'annonçait chaude et belle, elle s'est terminée dans un bain de sang. Il est 2 h 02 du matin lorsque Omar Mateen, armé d'un pistolet automatique et d'un fusil d'assaut, entre, ce dimanche 12 juin, par la porte de service du Pulse, un des hauts lieux de la nuit gay d'Orlando (Floride). Une série de rafales s'abat immédiatement sur la piste de danse. Les premières victimes s'écroulent. Une poignée des jeunes clients du club parviennent à sortir par la porte principale. Mais la grande majorité des quelque trois cents personnes présentes ce soir-là sont prises au piège. L'entreprise macabre de cet Américain d'origine afghane de 29 ans ne fait que commencer.

Dehors, vers 2 h 10, le premier blessé est transporté par des voisins aux urgences du centre médical régional d'Orlando. L'hôpital a la particularité d'être le plus important centre d'urgences traumatiques (« trauma center ») de la région. Il reçoit chaque nuit en moyenne quatre ou cinq patients blessés par balles. Surtout, il est situé à cinq pâtés de maisons du club, moins de deux minutes en voiture. Une chance inouïe pour les blessés, mais qui va mettre à rude épreuve les équipes de ce centre ultramoderne, pointant avec une acuité inédite les défis auxquels se trouvent aujourd'hui confrontés les services d'urgence.

Le diagnostic du premier patient ne laisse rien entrevoir de la catastrophe en cours, son état est stable. Au cours des cinq minutes suivantes, deux, trois puis cinq blessés sont amenés à l'hôpital dans un état bien plus critique. *« La première véritable vague de blessés est arrivée vers 2 h 30, une vingtaine en tout*, explique le docteur Gary Parrish, de permanence cette nuit-là. *Normalement, nous recevons des alertes qui permettent au personnel de se préparer. Or, là, il n'y a eu aucune information auparavant, aucun signe, rien. »*

Trier les patients au plus vite

En moins d'une demi-heure, les premiers médecins et plus d'une dizaine d'infirmières arrivent en renfort. Gary Parrish prend la décision de se placer en amont des urgences pour effectuer le tri des patients au plus vite. Huit blocs vont être ouverts simultanément. Les agents d'entretien s'emploient à les nettoyer au plus vite, afin que les chirurgiens puissent enchaîner les opérations. *« A un moment, nous étions 90 personnes de l'hôpital – en plus des patients – dans le service des urgences »*, précise le médecin urgentiste Timothy Bullard.

La deuxième vague de blessés, bloqués dans le club par le tueur, arrivera à 5 heures, quelques minutes après l'assaut de la police. Malgré le chaos apparent, la plupart des médecins affirmeront, par la suite, que le plan d'urgence a fonctionné efficacement. Sur les 44 victimes amenées à l'hôpital, 9 sont décédées dans les cinq minutes après leur arrivée. Aucune n'a succombé à ses blessures dans les soixante-douze heures qui ont suivi l'attaque.

Une semaine après, 27 blessés sont toujours hospitalisés, dont 6 en soins intensifs. Appelé vers 2 h 30 du matin, le chirurgien Chadwick Smith a effectué 28 opérations dimanche, 8 lundi et encore 8 le lendemain. Avec autant de patients, précise Timothy Bullard, les choix médicaux critiques doivent être faits rapidement, poussant les médecins à agir d'une manière *« plus agressive »*.

➔ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

Paléobiologie

Le quartz, conservateur de bactéries fossiles

Des traces de protéines ont été retrouvées sur des microfossiles piégés dans des roches depuis près de deux milliards d'années.

LIRE PAGE 3

Espace

Apprendre à vivre en circuit fermé

La conquête spatiale habitée impose de concevoir des systèmes de recyclage rendant autonomes les astronautes. Les obstacles à surmonter sont encore nombreux.

LIRE PAGE 2

Portrait

Il fait chanter les maths

Mathématicien et pianiste de talent, Moreno Andreatta, chercheur à l'Ircam, met la science au service des compositeurs de musique populaire.

LIRE PAGE 8

Se préparer à vivre loin de la Terre

ESPACE - Les futures missions spatiales pourraient imposer aux astronautes une autonomie de longue, voire très longue durée. L'Agence spatiale européenne vient de faire le point sur les recherches concernant la vie en « écosystème clos artificiel » et leurs applications terrestres

Dans le cadre d'une exposition, la NASA a imaginé une future campagne de recrutement d'explorateurs, d'agriculteurs, de réparateurs… NASA/KSC

A bord de la Station spatiale internationale [ISS], *réparer le système de purification du CO_2 n'est pas une sinécure, car cela prend deux ou trois jours de travail. A l'avenir, il faudra que cet instrument soit plus robuste. Ou plus simple à rafistoler…* » L'astronaute italienne Samantha Cristoforetti a récemment narré les péripéties de son séjour dans l'espace, à bord de ce que les spécialistes appellent un « habitat clos » ou un « écosystème clos artificiel », lors d'un double colloque organisé à Lausanne, en Suisse, par l'Agence spatiale européenne (ESA). Le recyclage du gaz carbonique n'était qu'un des aspects abordés.

En « boucle fermée »

Car pour un voyage spatial, long de plusieurs mois, voire une installation sur un autre astre, il s'agira autant de tout recycler (air, eaux, déchets) que de produire de la nourriture in situ. Impossible, en effet, d'emporter à bord tous les éléments nécessaires à la survie – leur masse serait considérable et le lancement coûterait un montant exorbitant. Quelque cent quarante experts du spatial, mais aussi d'autres domaines, se sont réunis durant trois jours à l'université de Lausanne pour évoquer ce futur de la conquête de l'espace. Ainsi que pour évaluer dans quelle mesure ces technologies durables peuvent déjà être appliquées sur la Terre.

L'ESA se penche sur ces questions depuis vingt-sept ans, à travers le projet Melissa, basé à l'Université autonome de Barcelone (UAB). *« Il s'agit d'une installation de démonstration consistant en cinq compartiments »,* explique Christophe Lasseur, l'un de ses responsables. En résumé, l'un des modules contient des rats. Un autre sert à transformer en oxygène le CO_2 qu'ils expirent, à l'aide d'algues. Lesquelles sont « nourries » avec des nutriments issus du recyclage, dans d'autres compartiments, des déjections des rongeurs ou des végétaux qu'ils consomment, eux aussi produits au sein de cette « boucle fermée ».

Mais on n'en est pas encore là : en 2015, seul le module des rats a été connecté avec celui des microalgues. *« Cette première étape fonctionne très bien,* assure Christophe Lasseur. *Ce que nous avons démontré, c'est que les modèles de fonctionnement de ces systèmes que nous décrivons et contrôlons à l'aide de formules et d'équations sont génériques, autrement dit qu'ils pourront être transposés dans d'autres expériences similaires. »*

Le pendant en orbite de cette expérience est d'ailleurs planifié. Au sein du projet Artemis, l'entreprise belge QinetiQ a développé un petit photobioréacteur pour étudier comment les micro-algues croissent dans l'espace. Et, avec cette société, la succursale de RUAG Space à Nyon planche déjà sur la suite, un environnement clos plus imposant, nommé Biorat 1, qui sera installé dans l'ISS. A l'intérieur, trois souris respireront l'oxygène généré sous forme de bulles par ces algues, en quantité cent fois plus grande que dans Artemis.

« Mais si, sur Terre, les bulles d'oxygène remontent à la surface du liquide de culture des algues et peuvent être séparées facilement, ce n'est pas le cas en apesanteur, détaille le responsable Samuel Gass. *Nous recourons donc à des membranes particulières pour gérer les échanges de gaz – CO_2 et oxygène – avec l'espace habité par les souris. »* Si tout va bien, ce bioréacteur à plusieurs millions d'euros, qui serait à terme plus efficace que les systèmes complexes de traitement de l'air en boucle ouverte équipant l'ISS, devrait y être installé pour trois mois dès 2020.

Dans le projet Melissa, la prochaine étape est d'adjoindre à la première boucle un troisième compartiment. *« Celui-ci va extraire de l'urine des nitrates, soit de l'engrais pour les algues, par un processus bactérien appelé nitrification »,* explique Christophe Lasseur. Le recyclage des liquides est en effet l'un des premiers défis : *« Pour un voyage vers Mars de trois ans avec six membres d'équipage, et à raison de 12 litres consommés par personne et par jour, il faudrait emporter 79 tonnes d'eau. C'est impossible ! »*, a souligné Siegfried Vlaeminck, de l'université d'Anvers (Belgique).

Mais transformer l'urine en eau potable et en extraire les nutriments n'est pas une affaire simple, est venu rappeler Kai Udert, de l'institut de recherche Eawag, à Dübendorf, qui développe, lui, des toilettes pour les pays pauvres : *« Une bonne nitrification dépend du pH du mélange liquide. Or ce pH varie en fonction de l'urée* [un des composés de l'urine], *qui s'évapore rapidement. Il s'agit donc de bien gérer les apports d'urine "fraîche". »* Tout cela sans même évoquer la récupération et le traitement des déchets solides, tels que les fèces ou les restes non comestibles dans les végétaux.

« Pour l'instant, ces mécanismes de recyclage, qui se font à l'aide de bactéries, correspondent à une "boîte noire", estime Vimac Nolla-Ardèvol, de l'université de Louvain (Belgique) : *on sait ce qui entre et ce qui sort, mais pas ce qui se passe entre les deux. Notre objectif est de caractériser dans les détails tous les mécanismes en jeu et le rôle de chaque* [type de] *bactérie »*, cela à l'aide des techniques génomiques et métabolomiques les plus poussées. Mais atteindre ce niveau de connaissances est-il indispensable pour imaginer une boucle complète de recyclage ? *« L'objectif est de simplifier au mieux tous nos modèles,* répond Francesc Godia, professeur à l'UAB et responsable de Melissa. *Et pour le faire correctement, il faut d'abord obtenir un maximum de détails. »*

Utile aussi sur la Terre

Au final, les défis sont multiples pour développer ce que ces spécialistes appellent des « systèmes de support vie ». Siegfried Vlaeminck les a bien résumés en citant les « dix commandements » à suivre pour les mettre au point : les rendre très efficaces, compacts, légers, robustes, compatibles avec l'environnement spatial, consommant peu d'énergie et d'intrants chimiques, dotés de réserves restreintes, imposant peu de risques à l'équipage et lui demandant peu de temps d'entretien.

Les avancées dans ces domaines sont *« intéressantes et cruciales, tant dans les matériaux que dans le recyclage de l'eau, de l'air et des déchets, parce qu'elles pourraient être aussi utiles sur la Terre »,* estime Oliver Botta, du Swiss Space Office. A l'université de Lausanne, le professeur d'écologie industrielle Suren Erkman, coorganisateur du colloque, voit aussi *« clairement une convergence des recherches entre ces deux domaines »*. Et d'indiquer que les avancées dans le recyclage de l'eau sont déjà exploitées depuis dix ans dans des « habitats clos terrestres », comme la station franco-italienne Concordia, située en Antarctique.

Longtemps vue comme singulière, cette vision, sur une Terre en mal de durabilité, intéresse de plus en plus les milieux économiques. En 2005 déjà a été créée IPStar, une agence visant à favoriser les transferts de technologies du programme Melissa. Et, en 2013, la société ESTEE a été fondée à Lausanne, et collabore avec des membres de Biosphere2. L'expérience conduite avec cet immense écosystème clos construit en 1991 aux Etats-Unis avait dû être interrompue, preuve de l'ampleur des défis qui restent à relever. ■

OLIVIER DESSIBOURG, « LE TEMPS »

Une molécule asymétrique trouvée dans la galaxie

ASTROBIOLOGIE - Pour la première fois, des astronomes ont identifié dans la Voie lactée une de ces molécules dites chirales

La Voie lactée est-elle ambidextre ? A-t-elle même deux mains différentes ? Ces questions étranges se reformulent plus rigoureusement. Il s'agit de savoir si les molécules produites aux origines des systèmes solaires, dans les nuages interstellaires de gaz et de poussières qui donneront naissance aux comètes, astéroïdes et autres planètes, ont des propriétés de symétrie comparables à celles de nos deux mains. Autrement dit, la forme tridimensionnelle d'une molécule se superpose-t-elle ou non à son image dans un miroir ? Pour les molécules simples comme l'oxygène, l'hydrogène, l'eau, l'ammoniac, la réponse est simple : leur image dans un miroir est identique à l'original.

Mais pour des molécules complexes, ou pour nos mains, le reflet peut être différent. Dans ce second cas, on parle de molécules chirales, et les deux formes sont dites énantiomères. En outre, ces deux objets ont des propriétés chimiques fort différentes. Par exemple, un énantiomère de la carvone sent la menthe et l'autre le curry. De telles molécules existent-elles dans la galaxie ?

Chaudrons du Système solaire

Oui, viennent de confirmer des astronomes américains dans un article de *Science* du 17 juin et lors du congrès de la Société américaine d'astronomie à San Diego. Grâce à deux radiotélescopes aux Etats-Unis et en Australie, ils ont détecté la présence d'un objet chiral dans l'un des plus grands nuages moléculaires de notre galaxie, Sagittarius B2. Il s'agit de l'oxyde de propylène, qui possède 3 atomes de carbone, 1 d'oxygène et 6 d'hydrogène. Son principal intérêt est de confirmer que la chiralité existe bien dans ces régions considérées comme les chaudrons du Système solaire. La galaxie peut donc avoir deux mains bien différentes.

« Cette découverte confirme que le milieu interstellaire est riche en synthèse à base de carbone. Cette chimie est vraiment créative », souligne André Brack, exobiologiste émérite à l'université d'Orléans, évoquant les millions de possibilités recensées par les chimistes. Mais ce n'est pas vraiment une surprise car les scientifiques ont déjà trouvé dans les météorites des molécules complexes chirales, en particulier des acides aminés et des sucres. *« Ce qui serait fascinant serait d'arriver à distinguer les deux énantiomères et de mesurer l'excès de l'un par rapport à l'autre »,* estime Uwe Meierhenrich, professeur de chimie à l'université de Nice.

Miroir brisé

Car le vrai mystère de la vie n'est pas la chiralité mais l'homochiralité, c'est-à-dire le fait que, des deux formes miroirs l'une de l'autre, une seule ait été gardée pour la biologie. Sur Terre, en effet, tous les acides aminés sont « gauches » et tous les sucres sont « droits ». Le miroir a été brisé. Aucun scénario complet n'existe pour l'instant pour expliquer ce phénomène. Tout au plus observe-t-on que, dans les météorites, un déséquilibre de quelques pour-cent en faveur d'une forme existe. Des expériences comme celles d'Uwe Meierhenrich, simulant des conditions régnant dans les nuages moléculaires, créent aussi un faible excès.

Pour ainsi déséquilibrer les lois de la nature qui tendent à fabriquer autant de produits « gauches » que « droits », il faut soit un coup de pouce du hasard, soit un ingrédient asymétrique. Exemple : un rayonnement ayant une polarisation dans un sens plutôt que dans l'autre, comme celui détecté dans le nuage d'Orion. *« Ensuite, il faut de toute façon des réactions chimiques autocatalytiques, pour amplifier le déséquilibre jusqu'à éliminer totalement un énantiomère,* indique André Brack. *Mais pour l'instant, personne n'en a trouvé dans les conditions prébiotiques. »*

Lors de la conférence de presse présentant leurs travaux, les auteurs ont expliqué qu'ils allaient tenter de mesurer l'écart entre les deux énantiomères de l'oxyde de propylène. *« Je ne crois pas que ce sera possible par ces techniques »*, note Louis Le Sergeant d'Hendecourt, chercheur à l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS, université Paris-Sud), qui a aussi contribué aux expériences simulant des réactions chimiques du milieu interstellaire. *« Il faudrait aussi confirmer la détection même de cette molécule car des spécialistes ont pointé les limites de ces méthodes »*, ajoute-t-il.

En tout cas, la Voie lactée a bien deux mains, mais il reste difficile de dire quand et comment elle a choisi de se couper un bras. ■

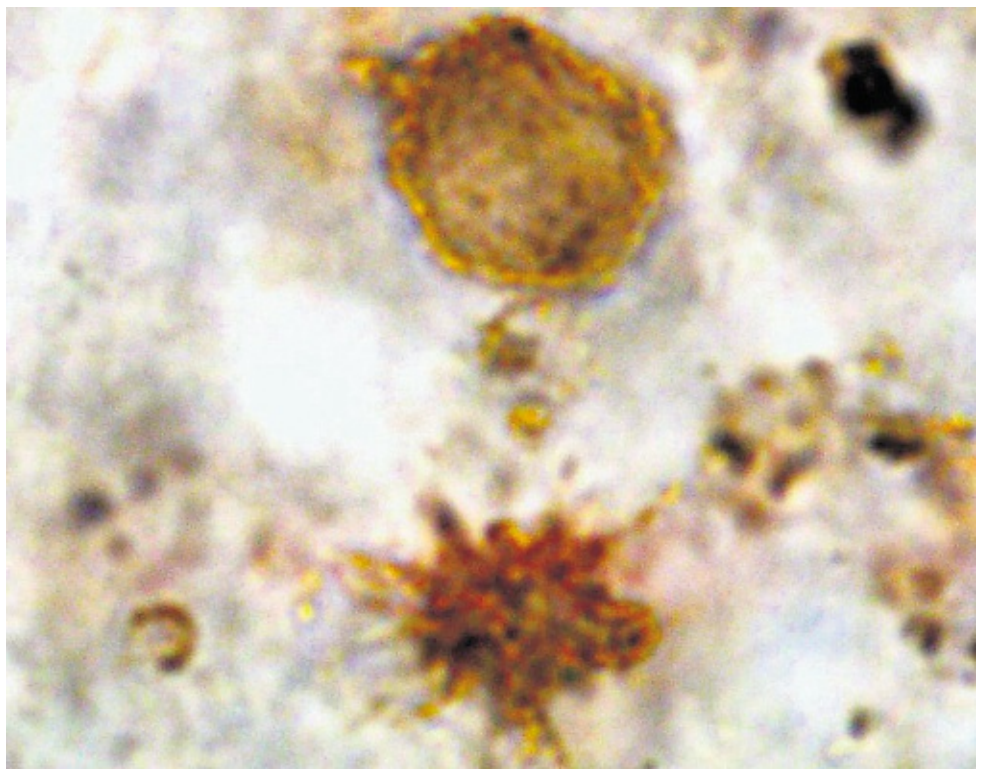
DAVID LAROUSSERIE

Des fossiles bien conservés pour leur âge

PALÉOBIOLOGIE - Une nouvelle méthode d'analyse a identifié des molécules organiques dans des bactéries pétrifiées il y a 2 milliards d'années. Elle sera appliquée à des microfossiles plus anciens

Plus on remonte dans le temps, plus les formes de vie sont minuscules et moins on est sûr que les signatures de leur présence dans les roches anciennes sont fiables. Les microfossiles trouvés dans des formations rocheuses australiennes, dites « de Pilbara », vieilles de 3,4 milliards d'années, font ainsi l'objet depuis un quart de siècle de vifs débats. Leurs découvreurs considèrent qu'il s'agit bien de bactéries filamenteuses, tandis que d'autres équipes assurent que ces traces microscopiques sont le résultat de réactions chimiques dans lesquelles aucun être vivant n'a pris part.

Ces querelles sont d'autant plus vives qu'il s'agit de prétendre au titre de découvreur des plus anciennes traces de vie que la Terre ait portées. L'Afrique du Sud est dans ce domaine un concurrent sérieux de l'Australie.



Microfossiles piégés dans une formation rocheuse vieille de 1,88 milliard d'années.
SYLVAIN BERNARD/CNRS-UPMC-MNHN-IRD

Signatures moléculaires

Une nouvelle technique d'analyse de ces microfossiles pourrait bien permettre de trancher ces débats, en donnant aux chercheurs la possibilité de prouver la présence dans les roches anciennes de molécules organiques, c'est-à-dire produites par des organismes doués de vie. *« C'est assez inattendu »*, commente Sylvain Bernard, de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (Sorbonne Universités, CNRS, Muséum national d'histoire naturelle), qui fait partie de l'équipe qui présente ces résultats dans *Nature Communications* du 17 juin. *« Dans des roches aussi anciennes, on pensait que ces molécules auraient été entièrement dégradées. »*

Les chercheurs ont en effet jeté leur dévolu sur des microfossiles piégés dans les cherts de Gunflint (« pierre à fusil »), une formation rocheuse de l'Ontario (Canada) qui, lors de sa découverte dans les années 1960, constituait le plus ancien « conservatoire » de vie fossile : 1,88 milliard d'années. *« Ces microfossiles sont connus sous toutes les coutures et servent de base de comparaison pour des microfossiles plus anciens »*, et plus controversés, indique Sylvain Bernard.

Avec ses collègues, il a donc soumis plusieurs échantillons de ces microfossiles à un rayonnement synchrotron, dans un accélérateur canadien, et obtenu des spectres d'absorption des rayons X qui montraient de fortes similitudes avec ceux produits par l'observation de micro-organismes modernes – *« des cyanobactéries et des microalgues cultivées dans notre laboratoire »*, indique-t-il.

La surprise a donc été de constater que ces signatures moléculaires étaient étonnamment proches, alors même qu'au cours des presque deux milliards d'années écoulées, ces microfossiles ont subi des périodes de chauffage allant jusqu'à plus de 200 °C, en raison de leur enfouissement profond, puis de la présence proche d'une bulle de magma. *« Le degré d'organisation du squelette des molécules indique la température maximale subie »*, précise le chercheur. Les microfossiles qui n'avaient pas dépassé 150 °C avaient clairement conservé la trace de groupes amides, c'est-à-dire des liaisons entre carbone et azote qu'on retrouve dans les acides aminés, les briques de base des protéines. *« C'est la première fois qu'on arrive à détecter un signal biochimique aussi ancien »*, se félicite Sylvain Bernard.

Les cherts de Gunflint constituent un linceul particulièrement approprié pour ces vies minuscules. Il s'agit de roches formées à partir de silice en solution, formant d'abord un gel qui se déshydrate pour devenir du quartz : *« Cela peut piéger très rapidement – quelques jours seulement – des micro-organismes et les protéger de la compaction. C'est pour cela qu'à Gunflint, on peut même les étudier en trois dimensions »*, précise Sylvain Bernard. L'équipe a reproduit ce processus en autoclave, sur des durées allant de dix à cent jours seulement, et constaté avec des microbes modernes qu'ils bénéficiaient bien de cette protection.

« La chimie de la vie ancienne »

L'étape suivante, déjà en cours, consiste à passer en revue les microfossiles avérés ou putatifs dans divers types de roches datant d'époques variées, *« afin de reconstituer ce que pouvaient être ces molécules »*. Pour mieux caractériser les organismes qui les ont produites, et *« avoir une meilleure idée de la chimie de la vie ancienne »*. Le synchrotron Soleil, à Saint-Aubin (Essonne), va être mis à contribution. *« On dispose d'échantillons australiens "frais" de 3,4 milliards d'années, et on a fait des demandes pour des roches d'Afrique du Sud de la même époque, qui sont plus difficiles à obtenir »*, indique Sylvain Bernard, qui précise que ces investigations ont déjà livré *« des choses très intéressantes »*.

Qui donc étaient ces microbes primitifs de Gunflint ? *« Probablement des bactéries, qui ressemblaient aux premiers organismes apparus sur Terre »*, répond Sylvain Bernard. La vie n'a cessé, depuis, de se complexifier. L'un des objectifs des chercheurs, en caractérisant ces premiers habitants de la Terre, est de voir si leur signature biochimique ne pourrait pas aider à la découverte de la vie ailleurs dans le cosmos. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nombre de laboratoires travaillant sur le sujet sont souvent également spécialisés dans l'étude des météorites et de l'astrobiologie... ■

HERVÉ MORIN

TÉLESCOPE

CANCER DU SEIN

Des chiens au service du dépistage

Plusieurs recherches ont suggéré que les chiens peuvent, par leur flair, détecter des tumeurs malignes, du poumon et de la prostate notamment. Pour évaluer cette approche dans les cancers du sein débute le projet KDOG, lancé par ITDC, une entreprise d'expertise cynophile basée en Haute-Vienne. Il est porté par l'Institut Curie, qui a levé 100 000 euros. Dans un premier temps, deux chiens seront exposés à des prélèvements de tumeurs et à des tissus imprégnés de transpiration de patientes, pour leur apprendre à reconnaître l'odeur des cancers du sein. Ensuite, les chercheurs leur soumettront, à l'aveugle, des tissus tests provenant de patientes malades ou de témoins. Si les résultats sont concluants, un essai clinique sera mené auprès d'une plus grande cohorte. L'un des avantages de cette stratégie de dépistage est son faible coût.

6

C'est le temps, en secondes, mis par les têtards de rainettes aux yeux rouges pour éclore et se laisser tomber dans l'eau, lorsque les œufs sont attaqués par un prédateur. Une équipe américaine a observé et analysé le comportement des embryons de ce spectaculaire amphibien d'Amérique centrale en reproduisant l'action d'un serpent fondant sur une grappe d'œufs. Résultat : en dégageant brutalement par le museau des enzymes spécifiques puis en s'agitant frénétiquement, les têtards parviennent à s'extirper de la gelée qui les englue non pas en plusieurs heures, comme normalement, mais en quelques secondes. Ainsi, 80 % des futures grenouilles survivent à l'agression.
› *Cohen et al.,* Journal of Experimental Biology, *14 juin.*

NEUROSCIENCE

Les oiseaux ont plus de neurones que les primates

Malgré leur petite cervelle, certains oiseaux, dont les perroquets et corvidés, ont des capacités cognitives surprenantes (utilisation d'outils, apprentissage du langage, résolution de problèmes...). La raison résiderait dans une plus grande densité neuronale, comme l'a constaté une équipe internationale en disséquant le cortex de 28 espèces d'oiseaux. L'étude a surtout porté sur la région du pallium, siège notamment du langage et de la mémoire. Au final, le roitelet huppé, dont le cerveau pèse 0,4 g, comme celui de la souris, possède 164 millions de neurones, contre 71 millions pour le rongeur. Le corbeau freux a deux fois plus de neurones que le ouistiti pour une masse cérébrale équivalente de 1,8 gramme. D'où la conclusion étonnante que certains oiseaux ont une capacité cognitive par masse cérébrale supérieure à celle des primates. Reste à savoir si cela est valable pour des espèces autres que celles étudiées.
› *Olkowicz et al.,* PNAS, *13 juin.*

Sport et mémoire, la tête et les jambes

NEUROLOGIE - Une activité physique quatre heures après un apprentissage aide à le mémoriser

Doper la mémoire en pédalant : en cette période de révisions intenses, les futurs bacheliers pourraient tirer profit d'une étude conduite par une équipe de l'université Radboud de Nimègue (Pays-Bas), selon laquelle, pour intégrer des connaissances et les retenir plus facilement, il serait utile de faire de l'exercice physique quelques heures après avoir fait fonctionner ses capacités cérébrales.

Pour aboutir à cette conclusion, présentée dans *Current Biology* le 16 juin, les chercheurs – qui avaient déjà étudié les bienfaits d'un sommeil de qualité sur la mémorisation – ont testé trois groupes de 24 participants en deux temps. Tous se sont d'abord livrés à un même exercice mental : ils avaient quarante minutes pour retenir 90 associations d'images et de lieux. Puis les membres du premier groupe ont dû immédiatement pédaler intensément sur des vélos d'appartement ; ceux du deuxième attendaient quatre heures avant de se livrer à cet exercice ; et ceux du troisième groupe en étaient dispensés.

Deux jours plus tard, tous les participants sont revenus passer une IRM cérébrale, durant laquelle ils devaient restituer l'apprentissage de l'avant-veille. Les chercheurs ont remarqué que le niveau d'activité de la région hippocampique, essentielle à la mémoire, était supérieur, chez les personnes qui avaient fait du sport quatre heures après l'apprentissage, à ce qu'il était chez les autres. Par ailleurs, les sujets de ce même groupe avaient une proportion de bonnes réponses plus élevée que la moyenne.

Selon les chercheurs, la pratique sportive aurait pour conséquence une libération plus importante de neuromodulateurs tels que la dopamine ou la noradrénaline. Ces substances sont constitutives du processus de codage cognitif, grâce auquel nous intégrons de nouveaux souvenirs, et prennent donc part au processus de consolidation mémorielle. Les chercheurs n'expliquent cependant pas pourquoi l'exercice physique immédiat n'a pas cette vertu, et veulent étendre l'étude pour déterminer la période optimale d'exercice physique.

« Stress stimulant »

« Ce résultat ne devrait pas être une surprise, commente Pierre-Marie Lledo, directeur de recherche à l'Institut Pasteur et au CNRS. *L'étude remet au goût du jour le lien unissant cerveau et corps, deux entités complémentaires qu'on essaie de séparer depuis Descartes. Jour après jour, on découvre des mécanismes permettant d'augmenter la mémoire. Ici, le sport semble jouer en favorisant la phase de consolidation et en créant une forme de stress stimulant. »*

L'activité sportive présente plusieurs avantages : elle est facile à mettre en place, peu coûteuse et bénéfique sur le plan sanitaire. L'expérience, si elle est confirmée, pourrait inspirer des programmes de rééducation et des traitements. Pour Pierre-Marie Lledo, *« les meilleurs programmes scolaires devraient combiner une activité cognitive intense le matin et une après-midi d'activité physique. Il ne faut pas sous-estimer le rôle du sport, qui a un double effet : il facilite la consolidation des acquis tout en luttant contre le surmenage qui peut mener à la saturation. »* Certaines organisations et entreprises ont déjà intégré le sport à leur stratégie de ressources humaines. ■

ANOUK HELFT

Le déraillement d'un TGV d'essai, le 14 novembre 2015, près de Strasbourg, a fait 11 morts et 42 blessés. Dans ce type de situation, les services de secours doivent effectuer un « triage préhospitalier », qui permet d'éviter la surmortalité due aux transferts d'un service à l'autre.
VINCENT KESSLER/REUTERS

L'urgence à l'ère des **« trauma centers »**

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

Face à l'escalade des cas de fusillade de masse aux Etats-Unis depuis des années, une *task force* (« force d'intervention ») a été constituée en janvier pour déterminer les moyens à allouer à la prise en charge des victimes.

En France, beaucoup de personnes ont découvert l'existence de ces « trauma centers » lors des attentats du 13 novembre 2015. Ces attaques multisites à Paris et à Saint-Denis ont fait 130 morts, dont 90 au Bataclan, et 350 blessés physiques, entraînant un afflux massif, inédit, dans les hôpitaux, de victimes de ce type de lésions.

La plupart de ces personnes (302) ont été prises en charge dans des établissements de l'Assistance publique, dont près de la moitié dans l'un des cinq trauma centers de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP). Le sixième centre d'Ile-de-France, l'hôpital d'instruction des armées Percy, à Clamart, a, lui, accueilli 18 blessés. Selon un bilan intermédiaire, publié fin novembre 2015 dans la revue britannique *The Lancet*, très peu de décès secondaires ont été déplorés : 4 seulement sur les 302 patients hospitalisés à l'AP-HP, en incluant 2 morts à l'arrivée dans un établissement, alors que 76 d'entre eux étaient pourtant classés « urgence absolue ». *« Le recueil de l'ensemble des données se termine, et l'analyse scientifique devrait être réalisée dans les semaines à venir »*, souligne le docteur Tobias Gauss, anesthésiste-réanimateur à l'hôpital Beaujon (AP-HP, Clichy).

Pas de chirurgie de guerre

L'expérience de l'Hôpital européen Georges-Pompidou (HEGP) a été présentée le 20 juin à Paris, lors d'une journée sur le thème de la médecine d'urgence face aux risques terroristes organisée par l'université Paris-Descartes et la Harvard Medical School.

Dans la nuit du 13 au 14 novembre, les équipes de Pompidou ont accueilli 41 victimes des attentats, dont plus de la moitié sont passées au bloc opératoire. *« Nous prenons régulièrement en charge des blessés par balles, peut-être une vingtaine par an. Là, nous en avons vu arriver 22, avec des lésions multiples, en l'espace de trois heures*, résume le professeur Emmanuel Masmejean, chef du service de chirurgie du membre supérieur au HEGP. *Grâce à une mobilisation exemplaire du personnel, quatre blocs opératoires ont fonctionné simultanément et en continu pendant quarante-huit heures. Et malgré le contexte, nous avons pu éviter la "chirurgie de guerre", y compris chez les blessés les plus graves. Cela veut dire que chacun a été pris en charge aussi bien que s'il avait été pris en charge isolément. »* Et aucun patient n'est mort.

« Ces événements ont créé une pathologie assez nouvelle en France, les traumatismes pénétrants, c'est-à-dire avec une ou plusieurs plaies par arme à feu ou explosifs », explique le professeur Mathieu Raux, anesthésiste-réanimateur à la Pitié-Salpêtrière, l'hôpital qui a reçu le plus de victimes (53) cette nuit-là. *« Aux Etats-Unis et en Amérique latine, les traumatismes pénétrants représentent 30 % à 40 % de tous les traumas. En Europe, la proportion est beaucoup plus faible. En Ile-de-France, avant les attentats de novembre 2015, les plaies par balles ne comptaient que pour 3 % des traumas »*, précise Tobias Gauss.

Au quotidien, les trauma centers accueillent principalement des accidents de la route (voiture, deux-roues…), des chutes… Les traumatismes sévères sont la première cause de mortalité et de morbidité du sujet jeune dans le monde. Il est donc nécessaire d'orienter les patients vers des centres hyperspécialisés. *« Une seule lésion*

TRAUMATISMES : 37 000 DÉCÈS PAR AN EN FRANCE

Accidents de la route, agressions, chutes, mais aussi brûlures, suicides… En épidémiologie, les traumatismes correspondent à une liste très large – et pas toujours intuitive – de causes. Celles-ci engendrent en France une mortalité importante, 37 000 décès par an au total, et un coût socio-économique mal documenté mais probablement considérable.

En légère baisse depuis 2000

« Nous classons les traumatismes en deux grandes catégories. Il y a d'une part ceux qui sont intentionnels, avec les agressions, faits de guerre, suicides… Et d'autre part les traumatismes non intentionnels, qui comprennent les accidents du travail, de la circulation et ceux de la vie courante », détaille Bertrand Thélot, qui dirige l'unité Traumatismes à l'agence nationale Santé publique France. En pratique, cette classification présente quelques particularités. *« Les traumatismes regroupent des entités très diverses, y compris les intoxications accidentelles aux médicaments et les manifestations graves d'allergie*, poursuit l'épidémiologiste. *De plus, certaines catégories se recouvrent partiellement : un accident du travail peut être un accident de la circulation, par exemple. Enfin, la distinction entre intentionnel ou non n'est pas toujours si évidente. »*

Pour étudier la mortalité par traumatisme, Santé publique France a recours aux données inscrites sur les certificats de décès, collectées par le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDC), de l'Inserm. Le nombre de morts par traumatisme en France est en légère baisse par rapport au début des années 2000, où il dépassait 41 000. Plus de 50 % de ces décès sont dus à des accidents de la vie courante. En 2010, ceux-ci ont été à l'origine de près de 21 000 morts, dont presque la moitié par chute (9 690), 3 196 par suffocation, 1 785 par intoxication, un millier par noyade et quelque 500 par exposition au feu ou aux flammes (dans un grand nombre de cas, la cause n'est pas précisée)…

« Les décès par accident de la vie courante touchent toutes les tranches d'âge, mais les plus de 65 ans représentent les deux tiers des cas, insiste Bertrand Thélot. *Le taux de mortalité lié à ces accidents est en baisse depuis les années 2000, de 3 % par an, mais il faut être prudent dans l'interprétation des statistiques. La diminution concerne surtout les enfants de moins de 15 ans. En effectifs, les décès par accident de la vie courante continuent à augmenter chez les personnes âgées, du fait de la pyramide des âges. »* Par ailleurs, le nombre de morts par suicide est d'environ 10 000 par an en France.

Les accidents de la route sont, eux, responsables de 3 500 décès annuels, un chiffre qui a été divisé par deux en quinze ans, grâce aux politiques de prévention routière, mais qui augmente à nouveau depuis deux ans. Ils restent la première cause de mortalité chez les jeunes. Les 15-29 ans représentent 22 % des personnes tuées sur la route, et un tiers des personnes qui y sont grièvement blessées.

Au total, 70 442 individus ont été blessés sur les routes françaises en 2015, un chiffre en légère baisse (– 3,6 % par rapport à 2014) ; 26 143 d'entre eux ont été admis à l'hôpital. Le devenir de ces patients est l'objet de la cohorte Esparr (Etude de suivi d'une population des accidentés de la route dans le Rhône), pilotée par l'épidémiologiste Martine Hours, directrice de recherche de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar). *« Les blessés graves apparaissent comme un enjeu majeur, il y en a autant que de morts »*, résume-t-elle. Un an après l'accident, les trois quarts des blessés de la cohorte ont encore des douleurs, selon les derniers chiffres connus, ceux de l'année 2012. Deux ans après, 50 % n'ont pas totalement récupéré leur santé antérieure, 30 % disent que cela a un impact sur leur travail, 20 % que cela a engendré des difficultés financières.

« 11 à 12 millions d'accidents »

Les conséquences des autres traumatismes en termes de gravité, d'hospitalisation, etc., sont, elles, estimées à partir de multiples sources : données hospitalières des fiches PMSI (programme de médicalisation des systèmes d'information), enquêtes en population ou thématiques (sur les noyades, les traumatismes crâniens…), études de cohortes telles qu'ELFE (Etude longitudinale française depuis l'enfance)…

« A eux seuls, les accidents de la vie courante engendrent chaque année en France 20 000 décès, 5 millions de passages dans un service d'urgence, suivis de 500 000 hospitalisations. Et on estime que leur nombre total est de l'ordre de 11 à 12 millions. La plupart sont bénins, mais le coût global en consultations médicales ou arrêts de travail est important », résume Bertrand Thélot. Le montant global de la facture reste flou. *« Des études menées dans des pays comme l'Australie et le Canada évaluent le coût des accidents et traumatismes entre 5 % et 10 % des dépenses de soins de santé. Mais en France il y a très peu de données économiques en accidentologie »*, note l'épidémiologiste de Santé publique France. ■

S. CA. ET P. SA.

Boulevard des Filles-du-Calvaire, à Paris, le 13 novembre 2015, alors que l'attaque terroriste contre le Bataclan est encore en cours. OLIVIER LABAN-MATTEI/M.Y.O.P. POUR « LE MONDE »

grave engageant le pronostic vital, par exemple un traumatisme crânien ou médullaire [de la moelle épinière]*, justifie une prise en charge en trauma center »*, insiste le docteur Anatole Harrois, anesthésiste-réanimateur à Bicêtre.

Au bloc dans la première heure

Les premiers trauma centers pour civils sont nés aux Etats-Unis en 1966, inspirés par la prise en charge des blessés au combat. Le principe : la rapidité, pour arriver au bloc opératoire dans la première heure, la *golden hour*. Une intervention chirurgicale précoce, permettant notamment d'arrêter des hémorragies, est en effet cruciale. L'efficacité a été démontrée dans une vaste étude américaine incluant 5 000 patients traumatisés, publiée en 2006 dans le *New England Journal of Medicine*. Le pronostic était plus favorable chez les individus pris en charge en trauma center que parmi ceux traités dans un hôpital non labellisé : 7,6 % contre 9,5 % pour la mortalité à l'hôpital, et 10,4 % contre 13,8 % pour la mortalité à un an.

Le système est organisé en trois niveaux, allant du niveau I, équipé pour réaliser 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, toutes les interventions chirurgicales y compris les plus spécialisées (neurochirurgie, chirurgie thoracique…), au niveau III, pour les cas plus simples.

En s'inspirant du modèle américain, la France a commencé à développer des trauma centers depuis une dizaine d'années. Il en existe actuellement une trentaine. L'organisation n'est pas complètement superposable au système américain. Outre-Atlantique, la prise en charge préhospitalière est assurée par des paramédicaux. Le principe est celui du *scoop and run* (« charger et courir »), avec une priorité à la rapidité du transport et un minimum de gestes réalisés sur place. La France est le seul pays à avoir médicalisé ses ambulances, avec le système SAMU-SMUR, né à la fin des années 1970. Le principe est le *stay and play* (« rester et agir »), qui consiste à stabiliser l'état d'un blessé avant de le transporter. Depuis quelques années, les stratégies sont plus convergentes. En France, l'évolution se fait vers un système *play and run,* qui consiste à réduire les gestes sur place à l'essentiel, sans perdre de temps.

« Il ne faut surtout pas passer à côté de quelque chose de grave. Dans le doute, il faut accepter une part de surtriage, c'est-à-dire de prendre en charge dans un trauma center des patients qui, finalement, n'en auraient pas eu besoin », précise le professeur Jacques Duranteau, chef du service de réanimation à Bicêtre (AP-HP).

« A l'arrivée du blessé, tout est préparé à l'avance pour ne pas laisser de place à l'improvisation, explique le docteur Sophie Hamada, anesthésiste-réanimatrice à Bicêtre. *Du sang O rhésus négatif est à disposition en cas de nécessité. »* En salle de déchocage, l'objectif est de faire le diagnostic des urgences vitales immédiates et de décider de la stratégie la mieux adaptée. L'organisation est essentielle, check-list à l'appui. Elle nécessite d'importants moyens humains.

Rééduquer au plus tôt

« La rééducation doit commencer le plus tôt possible dans le parcours de soins, ce qui augmente le potentiel de récupération du blessé », ajoute le docteur Anne-Claire de Crouy, du service de rééducation post-réanimation (SRPR) de Bicêtre. *« Cette structure permet d'avoir un lien permanent entre les réanimateurs et les rééducateurs »*, précise le professeur Duranteau.

Au-delà des soins techniques, les familles sont depuis quelques années au centre d'une grande attention des équipes. *« Il faut parfois expliquer l'impensable avec le risque de décès, de séquelles. C'est bien plus difficile que de réanimer un patient en train de mourir »,* concède le docteur Hamada. En état de sidération, les familles veulent à la fois la vérité et de la bienveillance. *« Les proches ont besoin d'être écoutés, rassurés, et parfois de bras pour s'y blottir »*, explique Peggy Eme, chargée de l'accueil à Bicêtre, qui est aussi un relais d'informations entre proches et soignants. *« Il y a d'abord le choc de l'accident, puis le deuxième choc de l'annonce des lésions, avec de lourdes séquelles possibles, puis l'annonce du besoin de rééducation et de soins pendant des années »*, résume le docteur Crouy. C'est la vie d'avant qui bascule.

Objectif : un réseau national

Pour tous ces spécialistes, l'objectif est désormais un réseau national, avec une labellisation par les tutelles. On en est encore loin. *« Force est de constater qu'en France, de tels réseaux de traumatologie n'existent pas de manière réglementaire »*, expliquaient Mathieu Raux et Tobias Gauss dans un éditorial publié par les *Annales françaises de médecine d'urgence,* en octobre 2015. *« Il n'existe pas de maillage couvrant l'ensemble du territoire* (…). *Ce déficit conduit à une prise en charge très hétérogène et potentiellement délétère pour le devenir de certains patients »,* poursuivaient-ils. Le docteur Gauss cite l'exemple d'une femme victime d'un grave accident dans une région où le premier trauma center était à 200 kilomètres. Elle n'y a été admise que cinq heures plus tard et elle est décédée à l'arrivée.

> « UNE SEULE LÉSION GRAVE ENGAGEANT LE PRONOSTIC VITAL JUSTIFIE UNE PRISE EN CHARGE EN TRAUMA CENTER »
> ANATOLE HARROIS
> ANESTHÉSISTE-RÉANIMATEUR

La région Rhône-Alpes a été la première à s'organiser, il y a une dizaine d'années. Un réseau est aussi constitué entre les six centres d'Ile-de-France : Beaujon, Bicêtre, la Pitié-Salpêtrière, Henri-Mondor, le HEGP et l'hôpital militaire Percy. *« Nous devons établir une vraie chaîne de soin comparable à ce qui existe dans l'arrêt cardiaque »*, plaide Jacques Duranteau, de Bicêtre.

En pratique, le système fonctionne beaucoup sur la bonne volonté des équipes. Cela a été le cas pour la création et le suivi d'un registre des patients, appelé « trauma base », créé en 2010. D'abord à l'échelle de l'hôpital Beaujon, il a incorporé progressivement les cinq autres centres franciliens. Des centres de province participent désormais à ce réseau.

Au total, 8 000 patients y sont aujourd'hui recensés, une vingtaine de projets de recherche clinique sont en cours ou ont abouti. *« Ces données sont précieuses pour évaluer l'efficacité du système de soins et faire de la recherche clinique, observationnelle et interventionnelle »*, souligne Tobias Gauss. La trauma base est soutenue financièrement par l'agence régionale de santé d'Ile-de-France, mais pas de façon pérenne. *« L'extension de ce registre de traumatologie régional au niveau national impliquera un financement par des fonds nationaux ou des partenariats extérieurs »*, prévoit cette agence.

Les événements du 13 novembre ont fait évoluer dans le bon sens l'organisation des soins, estiment les acteurs de terrain, qui notent une meilleure articulation entre le SAMU et les hôpitaux, notamment les trauma centers. *« Surtout,* insiste Tobias Gauss, *il y a une volonté de construire de la part de tous les acteurs. »* ■

NICOLAS BOURCIER (À ORLANDO), SANDRINE CABUT ET PASCALE SANTI

À GRENOBLE, L'ÉQUIPE DES PIONNIERS

La salle de déchocage offre une vue plongeante sur les massifs de Belledonne, de la Chartreuse et du Vercors. Un panorama magnifique dont l'équipe du trauma center du CHU de Grenoble (Isère) n'a pas souvent le loisir de profiter. Ce centre de référence pour la région Rhône-Alpes-Auvergne est l'un de ceux qui ont la plus grosse activité en France. Ici arrivent chaque année un millier de personnes souffrant d'un traumatisme, *« dont 600 cas graves »,* précise le professeur Pierre Bouzat, anesthésiste-réanimateur, responsable de l'unité déchocage-bloc des urgences. Comme les autres, le trauma center de Grenoble accueille de la traumatologie classique : accidents de la route (presque un cas sur deux), chutes… Un quart des patients sont des victimes d'accident de ski ou d'un autre sport de montagne : surf, parapente, alpinisme, VTT, randonnée, etc. C'est dans ce CHU qu'avait été transféré le pilote de F1 Michael Schumacher après son accident de ski à Méribel, le 29 décembre 2013.

Trente médecins formés par an

L'équipe grenobloise est aussi spécialisée dans la prise en charge des victimes d'avalanche. Autre particularité liée à la configuration géographique, beaucoup de blessés sont amenés par hélicoptère. C'est le seul moyen de transport qui permette de traverser la région en quinze minutes et de gagner ainsi un temps précieux.

Historiquement, les Grenoblois ont été les premiers en France à s'organiser à l'échelle régionale pour la prise en charge des traumatisés. *« Dans les années 2000, nous avons constitué un réseau de soins avec douze autres établissements. Il y a eu une concertation avec tous les acteurs pour définir le parcours optimal des patients*, explique le professeur Jean-François Payen, chef du pôle d'anesthésie-réanimation. *Parallèlement, nous avons créé un diplôme interuniversitaire pour la prise en charge des traumatismes sévères. Une trentaine de médecins sont formés chaque année. »*

Le Trenau (« trauma system » du réseau nord-alpin des urgences) fédère treize centres hospitaliers en Isère, Savoie et Haute-Savoie. Deux sont classés en niveau I : Annecy et Grenoble. Mais le CHU de Grenoble est l'établissement de référence, qui peut assurer les interventions chirurgicales et les soins de réanimation pour tous les types de traumas, y compris pédiatriques, et ce 24 heures sur 24. Il dispose d'une équipe dédiée, de trois salles de déchocage et d'un plateau technique complet. L'hôpital de Chambéry est au niveau II, les dix autres au niveau III.

« Le bon patient au bon endroit »

Pierre Bouzat et Jean-François Payen insistent sur la nécessité d'une bonne coordination entre les équipes tout au long de la chaîne de soins. *« L'un des éléments cruciaux est la qualité du triage préhospitalier, pour éviter les transferts secondaires qui augmentent la mortalité. C'est le principe du bon patient au bon endroit »,* souligne Pierre Bouzat.

Depuis 2009, un registre régional des traumas a été mis sur pied, financé par l'Agence régionale de santé. *« Cet observatoire exhaustif à 100 % permet de tracer le parcours de soins et de pister le devenir de chaque blessé. Nous pouvons ainsi évaluer les pratiques, faire de la recherche clinique, adapter les procédures. C'est aussi utile pour partager concrètement les expériences avec les équipes de terrain »*, liste le professeur Bouzat.

En 2015, le réanimateur et ses collègues ont publié l'analyse de trois ans d'activité du réseau Trenau dans la revue *Critical Care*. Ils ont ainsi pu vérifier que le système de triage était performant pour identifier les traumatismes graves et réduire le sous-triage (sous-estimation de la gravité de l'état d'un patient conduisant à son transfert dans un établissement de niveau insuffisant). Le taux de mortalité observé chez les 3 400 blessés concernés était statistiquement inférieur aux chiffres attendus compte tenu de la gravité des cas. Des indices rassurants quant à l'efficacité de l'organisation. ■

S. CA. (GRENOBLE, ENVOYÉE SPÉCIALE)

UN POISSON PILOTE POUR LA SCOLIOSE

La scoliose idiopathique, qui engendre des déformations de la colonne vertébrale chez 3 % de la population, pourrait être due à des mutations génétiques qui altèrent la circulation du liquide céphalorachidien. Ce mécanisme, dû à un défaut de motilité des cils recouvrant certaines cellules de la colonne vertébrale, a en tout cas été mis en évidence chez le poisson-zèbre. Plusieurs gènes, dont certains sont présents chez l'homme, sont impliqués. Ces malformations se manifestent lors de la croissance de l'animal, à l'adolescence. Les chercheurs, qui ont publié leurs travaux dans *Science*, le 10 juin, espèrent que le poisson modèle pourra permettre d'explorer des pistes thérapeutiques.
SCIENCE/AAAS

L'EXPOSITION

Révolutions urbaines

La Cité des sciences et de l'industrie met en scène la mutation des villes et les défis qu'elles affrontent

LAETITIA VAN EECKHOUT

Depuis 2008, plus de la moitié de l'humanité vit en ville, selon les Nations unies. Et, en 2050, la planète comptera 6,4 milliards d'urbains, plus des deux tiers de la population mondiale. Dès l'entrée, l'exposition que la Cité des sciences, à Paris, consacre aux «Mutations urbaines» nous fait vivre cette folle croissance: six compteurs égrènent en temps réel l'évolution du nombre de citadins de chaque continent, Asie en tête, avec un nouvel urbain chaque seconde… On pénètre alors dans un espace où l'on déambule comme on pourrait le faire dans une agglomération qui compterait trois centres. Le premier, baptisé «Ville en tensions», évoque les pressions immobilières, environnementales, relationnelles qui s'y exercent. Sur une maquette, le visiteur est invité à modifier l'organisation d'une cité fictive et à voir instantanément les effets sur la circulation ou les émissions de CO_2.

«Nous avons voulu cette exposition la plus participative possible, relève Sophie Manoff, commissaire adjointe de l'exposition. *Le visiteur est à la fois témoin et contributeur.»* Celui-ci est, de fait, invité à enrichir les contenus de l'exposition qui, après Paris, sera accueillie à Londres puis à Singapour.

Datavision et datasonorisation

Deuxième pôle, «Terre urbaine» nous plonge dans un voyage planétaire. Captivante et vertigineuse, une réalisation en datavision et datasonorisation, projetée sur un large écran hémisphérique, explique les transformations de la ville et les enjeux qu'elles soulèvent: 130000 données sont délivrées, concernant démographie, environnement, diversité des territoires urbains et répartition des richesses.

Enfin, le troisième espace, «Devenirs urbains», offre un tour d'horizon des innovations développées sur la planète pour «faciliter», «sécuriser», «oxygéner», «partager», «autonomiser» la ville. Les solutions présentées sont évaluées à travers le prisme des Objectifs du développement durable (ODD), d'un point de vue économique, social, environnemental et culturel.

Ce panorama des initiatives et innovations est complété par un périple audiovisuel dans quatre villes emblématiques: Copenhague, au Danemark, qui, en 2025, compte devenir la première métropole neutre en émissions de carbone; Medellin, en Colombie, qui a su désenclaver ses quartiers les plus pauvres situés dans les montagnes avec l'installation d'un métrocâble; Detroit, aux Etats-Unis, dont les habitants ont, pour résister à la crise, développé des pratiques alternatives, culturelles, sociales ou économiques, innovantes; enfin, Songdo, en Corée du Sud, ville connectée créée de toutes pièces, modèle de la «smart city» reproductible. *«La Cité des sciences ne porte pas de jugement,* tient à préciser Sophie Manoff. *Ce sont là quatre types de ville qui peuvent se développer à l'avenir.»* A chaque visiteur de se faire sa propre opinion. ■

> «La ville est à nous!», jusqu'au 5 mars 2017. Information: www.cite-sciences.fr

LIVRAISON

«Le Sex-appeal du crocodile»

L'exercice n'est pas nouveau mais toujours séduisant : raconter les mœurs sexuelles de nos amies les bêtes. Les auteurs, un dessinateur et un écrivain, font assaut de jeux de mots, d'anecdotes et d'humour pour brièvement et savoureusement décrire des scènes amoureuses connues ou méconnues chez les mouches, colibris, homards ou péripates… Le découpage retenu s'imposait : drague, Kama-sutra et… infidélités.

> de Marc Giraud et Gilles Macagno, Delachaux et Niestlé, 128 pages, 12,90 euros.

IMPROBABLOLOGIE

DE BATTRE MON CŒUR DE SUPPORTEUR S'EST ARRÊTÉ

Par PIERRE BARTHÉLÉMY

A moins de vivre quelque part entre Oulan-Bator et le désert de Gobi – et encore –, il n'aura échappé à personne que le championnat d'Europe des nations de football bat son plein en France. Si vous pensez prendre moins de risques pour votre santé en regardant un match à la télévision qu'en vous rendant dans un stade en compagnie de gentils hooligans russes, vous vous trompez lourdement. Car non seulement le cocktail foot-canapé-copains-bières-clopes-pizzas et chips à gogo ne manquera pas d'avoir un profond impact sur ledit canapé, sur votre compte en banque (après le divorce consécutif au massacre du canapé) et sur votre taux de cholestérol, mais il vous menace également d'un accident de santé aussi grave que la rencontre de votre crâne avec le démonte-pneu brandi par un supporteur du CSKA Moscou. En effet, à en croire plusieurs travaux de recherche, visionner un match de foot capital met votre palpitant au court-bouillon et peut vous rapprocher dangereusement de la crise cardiaque.

On ne pourra répertorier ici toutes les études qui ont abordé le sujet. Citons tout de même un article britannique paru dans le *British Medical Journal* (*BMJ*) en 2002 et qui émettait l'hypothèse que les effets conjoints du stress et de la colère étaient susceptibles, comme on l'avait constaté lors de séismes ou de conflits armés, de déclencher des accidents cardio-vasculaires, mais cette fois chez des fans de ballon rond. Ces chercheurs ont ainsi analysé les entrées à l'hôpital enregistrées après le tragique Argentine-Angleterre de la Coupe du monde 1998 – pour rappel, les pousseurs de baballe de Sa Majesté furent saqués au terme d'une rencontre conclue par l'angoissante épreuve des tirs au but. Pendant les deux jours qui suivirent cette défaite vue par 24 millions de personnes outre-Manche, le nombre d'admissions pour accident cardiaque augmenta de 25 % (par rapport à la même période de 1997 et 1999), sans que les autres causes d'hospitalisation bougent significativement. Les chercheurs jugent peu probable que cette hausse soit due au hasard.

Un autre exemple du même tonneau est donné par une étude suisse publiée en 2006 dans l'*International Journal of Cardiology*. Ses auteurs ont fait le compte des morts subites cardiaques survenues pendant la Coupe du monde 2002 dans un bassin de population de 1,5 million d'Helvètes, et comparé le nombre obtenu avec celui enregistré l'année précédente sur la même période. Résultat: une augmentation de 63 %. Le pourcentage est encore plus élevé si l'on ne considère que la population masculine…

A la vue de toutes ces horreurs, l'étude du *BMJ* conclut ainsi: *«Peut-être la loterie de la séance des tirs au but devrait-elle être abandonnée pour des raisons de santé publique?»* Gageons qu'il serait bien plus sain de supprimer purement et simplement les retransmissions des matchs, ou bien de diffuser ceux-ci en différé et en annonçant le score final dès le départ…

Alors, mortel le foot? Pas si l'on se trouve dans le camp des vainqueurs. Une étude française parue dans *Heart* en 2003 souligne que l'euphorie collective qui s'empare d'une nation en cas de triomphe footballistique peut avoir un effet positif. Ses auteurs ont ainsi noté que l'historique succès des Bleus en finale de la Coupe du monde 1998 (3-0 contre le Brésil, pour ceux qui me lisent à Oulan-Bator) s'était accompagné d'une baisse de la mortalité pour raisons cardio-vasculaires. En affirmant que la victoire avait mis du baume au cœur de la France, on ne croyait pas si bien dire. ■

AFFAIRE DE LOGIQUE – N° 969

Les nombres de Bob

Bob, qui a participé sur le site *http://tquiz.org/concours* au jeu « Diviser pour régner » sur les critères de divisibilité par 3 et 9 (concours encore en ligne jusqu'au 25 juin), vient de faire une découverte qu'il annonce fièrement à Alice :
« Le nombre 345 est divisible par 3 mais pas par 9, et, lorsqu'on lui ajoute le produit de ses chiffres (60), cela donne 405, un résultat divisible par 9. J'ai décidé que tout nombre ayant cette propriété s'appellerait désormais nombre de Bob. »
Quel est le plus petit nombre de Bob ? Le plus grand inférieur à 100 000 ?
Alice en extrait une sous-catégorie, que nous appellerons *nombres d'Alice*. Il s'agit des nombres divisibles par 3 mais pas par 9, formés de chiffres distincts, qui, lorsqu'on leur ajoute le produit de leurs chiffres, donnent un résultat divisible par 9.
Quel est le plus grand nombre d'Alice inférieur à 100 000 ? Et le plus grand de tous ?

SOLUTION DU N° 968

Il est impossible de réaliser un collier de 100 perles de 3 couleurs toujours représentées sur 5 consécutives, mais jamais à la suite. C'est faisable en revanche avec 102 perles.
On commence par écarter les suites de 3 perles de la même couleur qui entraînent que les deux suivantes sont forcément des deux autres couleurs.
On part donc de 2 perles de la même couleur, qu'on complète à droite par une troisième : 🔴🔴🟢.
La suivante ne peut être 🔵 (suite de 3 couleurs), ni 🔴 (sous peine d'obliger 🔴🔴🟢🔴🔵). On a donc 🔴🔴🟢🟢🔵, complétée, avec un raisonnement similaire, par 🔵.
De proche en proche, on montre que la séquence 🔴🔴🟢🟢🔵🔵 doit se succéder indéfiniment, ce qui n'est possible que si le nombre de perles est multiple de 6.
Avec 100 perles de 4 couleurs, toutes représentées parmi 6 consécutives mais jamais à la suite, nous conjecturons la même impossibilité avec 100. C'est possible avec 102.
Exemple : 17 séquences de la forme 🔴🟢🔴🔵🔴🟡.
Les lecteurs sont invités à proposer leurs solutions à notre conjecture à l'adresse mail ci-dessous.
On peut en revanche envisager une succession de 100 perles où, sur 7 perles consécutives, les 4 sortes figurent sans se suivre.
Exemple : 14 séquences de 7 perles de la forme 🔴🟢🟡🟢🔵🔵🔵, et un groupe de 2 perles 🔴🟡.
D'où, la configuration centrale :
🔴🟢🟡🟢🔵🔵🔵🔴🟡🔴🟢🟡🟢🔵🔵🔵

ÉLISABETH BUSSER ET GILLES COHEN © POLE 2016 affairedelogique@poleditions.com

Expositions mathématiques sans frontières

Mathématiques sans frontières est le nom de compétitions internationales de jeux mathématiques auxquelles peuvent participer, pendant l'année scolaire, collégiens et lycéens. Mais il s'agit ici d'expositions rendez-vous qui sont donnés cet été, non loin de la France. Alors, si le cœur vous en dit…

• **Fête des maths, à Quaregnon (Belgique), le 3 juillet**
Forte de son succès lors de la journée du π-Day (le 14 mars) fêtée le 13 en 2016, la *Maison des maths* de Quaregnon (à une vingtaine de kilomètres de Maubeuge) organise une autre grande journée, la Fête des mathématiques, qui sera riche en « ani-math-ions » pour petits et grands.
Informations et inscriptions sur http://maisondesmaths.be

• **Exposition « Formes et formules », à Lisbonne**
Si vous passez par Lisbonne, ne manquez pas, au Musée national d'histoire naturelle et des sciences, cette exposition qui, jusqu'en décembre 2016, fait comprendre que les mots « formes » et « formules » ne sont pas seulement proches par le son ou l'étymologie. On y découvre que, derrière des formules mathématiques parfois compliquées, se cachent des formes étranges qui peuvent varier harmonieusement par la simple modification d'un coefficient, et l'on voit comment l'architecture moderne en a fait de merveilleuses applications.
Informations et inscriptions sur www.museus.ulisboa.pt

• **Exposition « T'es où ? », à Genève**
Au Muséum d'histoire naturelle, au bord du lac de Genève, une autre exposition rappelle combien les mathématiques sont entrées dans notre vie. On y trouve la technologie du GPS d'aujourd'hui, mais aussi ce qui l'a précédée : coordonnées géographiques, triangulation, formules oubliées de géométrie du triangle, ainsi qu'un catalogue d'instruments de mesure d'angles et de distances ou l'utilisation de l'ombre d'un bâtiment pour mesurer sa hauteur.
Informations sur www.ville-ge.ch/mhs

CARTE BLANCHE

L'origine des trous noirs supermassifs

Par ROLAND LEHOUCQ

Tout le monde se rappelle Gargantua, le trou noir géant au cœur de l'intrigue du film *Interstellar*. Ce genre d'objet existe réellement, et les observations suggèrent qu'à peu près toutes les galaxies possèdent un trou noir supermassif en leur centre.

Dans le cas de notre galaxie, les indications les plus significatives de la présence de ce trou noir viennent de l'étude du mouvement des étoiles les plus proches du centre galactique, dans la région appelée Sagittarius A*. La détermination de leurs paramètres orbitaux a permis d'estimer la masse de l'objet qui en est la cause : il serait environ 4 millions de fois plus massif que notre Soleil. Et ce n'est pas le plus gros que nous connaissons ! Le centre de certaines galaxies actives, comme Messier 87, abrite des trous noirs dont la masse dépasse le milliard de masses solaires !

Un mécanisme d'accumulation

Comment de tels monstres ont-ils pu se former ? Le cas des trous noirs stellaires, dont la masse est de quelques masses solaires, est déjà compris : ils résultent de l'effondrement gravitationnel des étoiles à neutrons, cadavres des étoiles très massives. En 1939, le physicien américain Robert Oppenheimer a montré que la gravitation l'emporte définitivement sur toutes les autres forces si l'étoile à neutrons dépasse 3,3 masses solaires. Elle s'effondre alors en trou noir. Pour qu'il devienne supermassif, il semble alors naturel d'invoquer un mécanisme d'accumulation : un trou noir stellaire grossit petit à petit en absorbant la matière environnante.

Ce scénario simple a cependant le défaut de nécessiter un temps considérable. En effet, la matière tombe sur le trou noir en formant un disque en rotation, comme celui qui est représenté autour de Gargantua. Echauffé par l'accélération qu'elle subit et les frictions internes qui en résultent, la matière du disque devient très lumineuse. L'énorme quantité d'énergie rayonnée limite la chute de la matière vers le trou noir, rendant sa croissance plus difficile.

Même dans les meilleures conditions, un trou noir supermassif mettrait au bas mot un milliard d'années pour se former. Problème : des observations ont révélé la présence de trous noirs supermassifs dans des galaxies très lointaines, formées quand l'Univers n'avait que quelques centaines de millions d'années.

Avant les premières étoiles

Une façon d'en rendre compte est d'imaginer que, lors de la formation d'une galaxie, la matière en effondrement forme directement un trou noir d'environ 100 000 masses solaires avant de produire les premières étoiles. Une fois formé, ce trou noir aurait alors le temps de grossir par accumulation de matière pour devenir supermassif.

Pour tester ce scénario, des astrophysiciens italiens ont calculé la façon dont un tel trou noir rayonnerait durant sa formation, essentiellement en infrarouge et en rayons X. Ils ont ensuite épluché un catalogue de galaxies lointaines, et donc anciennes, réalisé grâce au télescope spatial Hubble.

Parmi les 2 000 objets les plus intéressants, deux ont une émission lumineuse cohérente avec le modèle théorique. C'est peu, mais suffisant pour rendre l'hypothèse crédible et donner un nouvel objectif scientifique au successeur du télescope Hubble, le James Webb Space Telescope, qui doit être lancé en 2018. Espérons qu'alors l'énigme de la formation des trous noirs supermassifs, qui jouent un rôle important dans la formation et l'évolution des galaxies, sera résolue. ■

Roland Lehoucq
Astrophysicien,
Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives
PHOTO : MARC CHAUMEIL

Primes ou crédits de recherche détournés ?

TRIBUNE - Le versement à certains chercheurs de primes individuelles « au mérite » participe d'une politique de précarisation et de privatisation de la recherche, estime **Samuel Alizon** (CNRS), qui a refusé celle qui lui a été attribuée

Depuis 2010, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) octroie une prime aux chercheurs ayant obtenu une des énormes bourses de l'European Research Council (ERC), une agence de moyens qui finance des projets de 1,5 à 2,5 millions d'euros. Cette prime, l'indemnité spécifique pour fonctions d'intérêt collectif (Isfic), s'élève à 50 000 euros sur cinq ans. Bénéficiaire de l'un de ces pactoles, j'ai pourtant demandé à ne pas toucher cette Isfic, demande à laquelle, après beaucoup de résistance (et d'incompréhension), le CNRS a fini, exceptionnellement, par accéder.

Accepter cette prime – qui représente presque deux ans de mon salaire – me poserait en effet un problème éthique. Appelons un chat un chat, ce serait un détournement de fonds : 50 000 euros net versés à un chercheur, c'est 69 000 euros amputés à l'enveloppe remise par l'ERC à l'organisme de tutelle et qui contribue au bon déroulement du projet, en fournissant par exemple des locaux ou en employant du personnel administratif.

Un mépris du travail collectif

On me rétorquera que la prime Isfic compense la surcharge de travail suscitée par un projet ERC. Notre direction pense-t-elle vraiment que les 97 % de chercheurs du CNRS qui n'ont pas la chance d'être financés par l'ERC ont une charge de travail inférieure d'un tiers ? D'autre part, pourquoi ne pas prendre en compte la surcharge de travail des gestionnaires de laboratoire ? Dans mon unité, le CNRS affecte une gestionnaire pour quatorze chercheurs CNRS, chacun ayant ses propres projets de recherche. Malgré deux financements ERC obtenus en 2015 dans l'unité, aucun renfort n'est prévu pour gérer toutes les commandes, missions et recrutements additionnels. N'est-il pas plus pertinent d'embaucher du personnel pour effectuer les tâches administratives supplémentaires que de verser une prime individuelle ?

C'est que la prime Isfic relève, en fait, d'une logique de rémunération au mérite pour les chercheurs qui pose plus d'un problème. Alors que des résultats de qualité sont impossibles sans le travail de doctorants, de techniciens, de collaborateurs, tout cet environnement collectif est méprisé par une récompense attribuée à un chercheur seul.

Sur un autre plan, même si la qualité de l'évaluation scientifique de l'ERC fait l'unanimité, son faible taux de réussite laisse une énorme part à l'aléatoire. Depuis 2008, moins de 3 % des 11 000 chercheurs du CNRS ont obtenu une bourse ERC. Dans ces conditions, la réussite auprès de l'ERC peut-elle servir de critère pour différencier des rémunérations au même grade, alors qu'au sein du CNRS avancement et promotions sont décidés par des commissions nationales, où s'exercent des choix collectifs et transparents ?

Outre ces raisons de principe, refuser la prime est aussi un choix pragmatique : le CNRS ayant accepté que les 69 000 euros soient conservés par mon laboratoire, je suis assuré de pouvoir mener mes recherches au terme du financement de l'ERC. Car les crédits de recherche fondamentale laissent de plus en plus la place aux applications directes et aux logiques à court terme.

« CES PROBLÈMES RÉSULTENT D'UNE VOLONTÉ POLITIQUE ET IDÉOLOGIQUE DE SACRIFIER LA RECHERCHE FONDAMENTALE ET LES SERVICES PUBLICS »

Ce mois-ci, tout le comité d'évaluation scientifique de l'Agence nationale de la recherche (ANR) en mathématiques et informatique a ainsi préféré démissionner plutôt que de gérer la pénurie et d'avaliser une logique purement administrative. Comment accepter la prime, alors que la majorité de mes collègues doivent se battre tous les ans pour obtenir un dixième de son montant afin de pouvoir simplement travailler ?

La logique de précarisation de la recherche fondamentale se manifeste aussi dans la dégradation de l'emploi. Au CNRS, le nombre de postes ouverts chaque année au concours « chercheurs » est passé de 400 en 2010 à 300 en 2014. La casse est encore plus forte du côté des ingénieurs et techniciens. Cela n'est pas sans lien avec les primes. Si le CNRS ne peut pas créer tous les emplois que lui autorisent les lois de finances actuelles (plus de 500 postes par an sont concernés), c'est directement lié aux primes (160 millions d'euros en 2014), pour la plupart opaques et inégalitaires.

Ces problèmes dépassent, bien sûr, le CNRS. Ils résultent d'une volonté politique et idéologique de sacrifier la recherche fondamentale et, plus largement, les services publics.

Le crédit d'impôt, un gaspillage

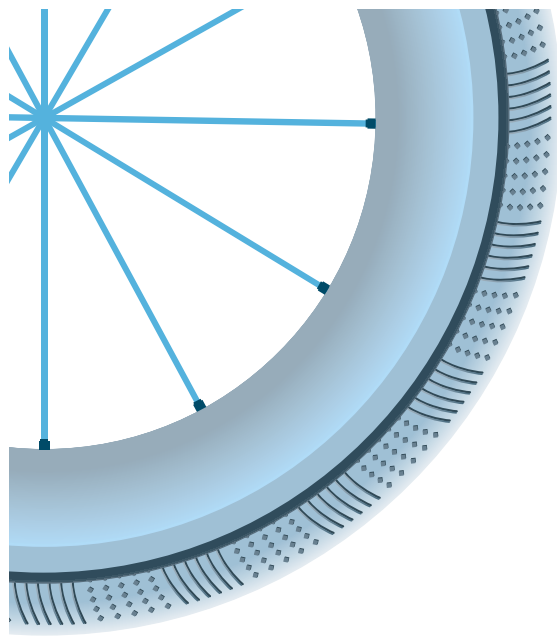
Idéologique, car de l'argent il y en a. Dans le cas de la recherche, 6 milliards d'euros ont encore été gaspillés en 2014 pour un crédit d'impôt recherche qui sert avant tout de niche fiscale aux grandes entreprises, comme l'a montré un rapport de l'association Sciences en marche. A titre de comparaison, 6 milliards, c'est deux fois le budget annuel total du CNRS (y compris les salaires des 33 000 agents) et douze fois celui des projets financés annuellement par l'ANR – dont des projets d'entreprises privées, ce qui montre au passage que les prétendues incitations fiscales à la recherche pourraient être évaluées. Mais le gouvernement a préféré s'attaquer, en mai, au budget des instituts de recherche et des universités...

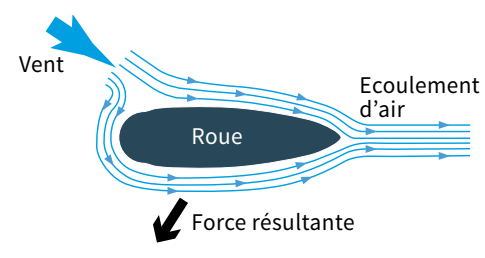
Il y a urgence à agir et à rompre avec les politiques bornées de précarisation et de privatisation de ces dernières années. La crise que traverse la recherche fondamentale en France est profonde. Dans ce contexte, quelques dizaines de milliers d'euros versés à une poignée de chercheurs jugés méritants font partie du problème, pas de la solution. ■

Samuel Alizon, chargé de recherche au CNRS, laboratoire Mivegec (Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle), a publié *C'est grave Dr Darwin ? L'évolution, les microbes et nous* (Seuil, 230 pages, 20 euros).

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

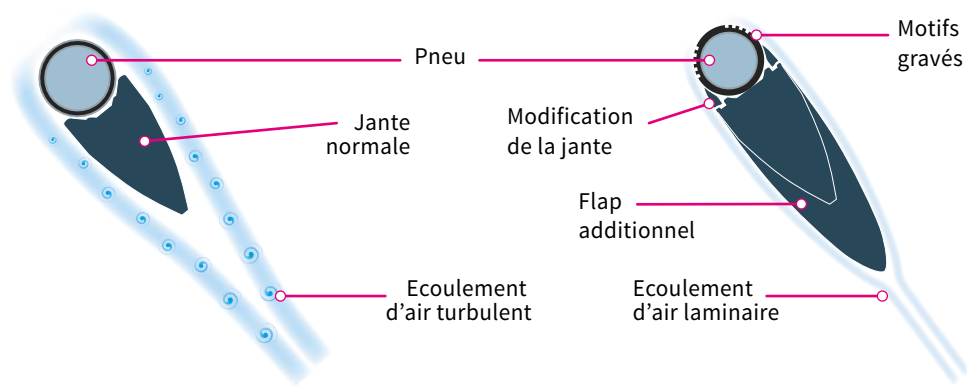
UNE ROUE QUI AVANCE TOUTE SEULE... OU PRESQUE

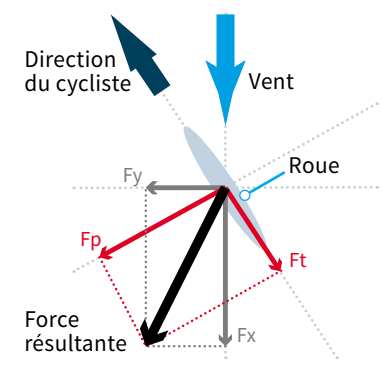




La portance

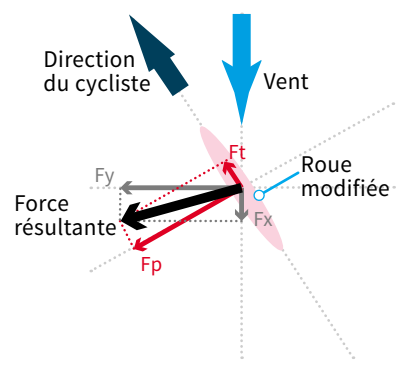
Les différences de vitesse de l'écoulement des deux côtés du profil créent des écarts de pression entre les deux régions, et finalement une force dite de « portance ».





Roue classique

Un profil au milieu d'un écoulement d'air subit une force de traînée, Fx, et une force de portance, Fy (liée aux différences de pression entre les deux faces de l'écoulement). La force résultante, vue du cycliste, peut se décomposer aussi en deux autres forces, Ft (s'opposant à l'avancée) et Fp (perpendiculaire aux roues).



Profil amélioré

En améliorant l'aéorodynamie, selon l'angle du vent par rapport à la route, Fx peut diminuer, et changer la résultante au point que Ft devienne une poussée et non une traînée. La clé vient des motifs de quelques millimètres gravés sur le pneu qui « collent » l'écoulement le long du profil, limitant les tourbillons.

INFOGRAPHIE : PHILIPPE DA SILVA

SOURCES : MAVIC, FLAVIO NOCA

Depuis 2012, l'entreprise française Mavic vend aux cyclistes des roues magiques qui, en fonction du vent de face, créent une poussée plutôt qu'une force de traînée. Au congrès Sports Physics, le 9 juin à Palaiseau, Flavio Noca, de la Haute Ecole spécialisée de Suisse occidentale (Genève), qui travaille avec le fabricant, en a révélé le fonctionnement étonnant.

La géométrie de la jante ressemble à celle d'une aile d'avion, avec un volet affinant la jonction entre le pneu et la jante. Surtout, les gravures sur le pneu évitent la formation d'une région turbulente. Leur effet exact reste à l'étude. L'entreprise estime faire gagner plus de 40 secondes sur 40 kilomètres par rapport à des roues classiques. Au triathlon d'Hawaï, en octobre 2013, le gagnant, Frederik Van Lierde, utilisait cet équipement, dont la version avec les « flaps » est interdite sur le Tour de France. ■

DAVID LAROUSSERIE

Moreno Andreatta, « mathémusicien »

PORTRAIT - Mathématicien, pianiste, chercheur à l'Ircam, il met les partitions en équations et ses compétences au service des musiques populaires, notamment de la chanson

Moreno Andreatta est-il un mathématicien qui joue du piano ? Ou un musicien qui fait des maths ? Difficile de trancher, tant ces deux activités sont imbriquées chez ce chercheur de l'équipe Représentations musicales de l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique (Ircam), à Paris. Qu'on en juge : il est à la fois titulaire d'un Premier Prix de piano au conservatoire de Novare, en Italie, et d'une habilitation à diriger des recherches à l'Institut de recherche mathématique avancée de Strasbourg, et il a financé sa thèse en musicologie computationnelle en improvisant au piano-bar, chaque samedi, à bord du *Bretagne,* de la compagnie des Bateaux parisiens.

« J'ai grandi dans la musique », se souvient-il. Son père est pianiste, lui-même commence le piano dès 3 ans. Mais les mathématiques aussi le ravissent. Aujourd'hui, à 45 ans, il réussit enfin à combiner ses deux passions. Avec succès, puisqu'il vient d'être promu directeur de recherche au CNRS. *« C'est la première fois qu'un projet sur les rapports entre mathématiques, informatique et musique fait l'objet d'un tel poste au CNRS,* se réjouit-il. *Je serai chercheur invité à l'université de Strasbourg l'an prochain, et mes nouvelles recherches seront centrées sur l'articulation entre musique savante et musiques actuelles : pop, rock, chanson et jazz. »*

Moreno Andreatta, chercheur à l'Institut de recherche et coordination acoustique/musique (Ircam), à Paris, le 15 juin. AUDOIN DESFORGES POUR « LE MONDE »

Un « désordre organisé »

C'est lors de son master 2 de mathématiques, en Italie, qu'il a découvert *Musique formalisée,* du compositeur grec Iannis Xenakis, pionnier de l'utilisation des mathématiques en musique savante. Dans ce livre, Xenakis explique comment il compose à partir de fonctions mathématiques. Une révélation pour Moreno Andreatta : il n'est pas obligé de choisir entre la musique et les maths. *« Je me suis alors intéressé à la construction de "canons rythmiques mosaïques", pour mon mémoire de master : il s'agit de faire jouer à plusieurs percussionnistes des motifs rythmiques conçus de manière qu'aucun ne joue en même temps, mais qu'il n'y ait pas non plus de silence,* explique le chercheur. *C'est un "désordre organisé", pour reprendre une belle expression du compositeur Olivier Messiaen. Bien sûr, il y a des solutions très simples, par exemple, quand les rythmes sont réguliers. Mais, lorsqu'on cherche toutes les manières de remplir ces contraintes, cela devient un problème mathématique complexe, qui reste ouvert. Aujourd'hui, je codirige une thèse sur ce sujet. »*

Direction la France, pour un autre master, cette fois en musique et musicologie du XXe siècle à l'Ircam, *« le seul master alliant recherche musicologique et modèle mathématique »*, note-t-il. Il s'attaque, notamment, au problème des hexacordes (accords de six notes) : prenons six notes au hasard dans une gamme (qui en comporte douze). Les six notes qui ne sont pas jouées forment à leur tour un accord qui correspond au complémentaire de l'accord choisi. En effet, il existe la même répartition d'intervalles dans les deux accords. *« C'est un théorème* [appelé aussi théorème de Babbitt, du nom du théoricien et compositeur américain Milton Babbitt] *qui est connu depuis les années 1960, et dont on peut trouver au moins cinq démonstrations mathématiques différentes ! »*, souligne Moreno Andreatta. Ces hexacordes ont été utilisés par des compositeurs dodécaphoniques comme Arnold Schoenberg.

Ce travail sur les accords se rapproche de la cristallographie. Lorsqu'on envoie des rayons X sur des cristaux, ceux-ci font apparaître sur un papier photo des taches régulières formant un motif caractéristique du cristal. Or, certains cristaux, bien que différents, engendrent le même motif : on dit qu'ils sont homothétiques. De même, en musique, un hexacorde et son complémentaire sont homothétiques, même si l'impression sonore est différente. Si on s'intéresse aux accords de quatre notes (plus fréquents en musique populaire) ayant le même motif, on peut créer de nouvelles musiques fondées sur ces accords homothétiques. *« On met en relation deux accords qui semblaient n'avoir rien à voir, mais qui sont comme des jumeaux*, explique le chercheur. *Et c'est un problème qui intéresse les mathématiciens : comment énumérer les accords homothétiques dans tous les types de gammes ? »*

Autre question qui le préoccupe : comment représenter les suites d'accords de façon géométrique ? On peut disposer les notes sur un plan, selon deux axes, l'un représentant les tierces majeures (*do-mi* par exemple), l'autre les tierces mineures (comme *la-do*). Un accord est figuré par un triangle dans ce plan. Cette représentation, appelée *Tonnetz* (« réseau de notes » en allemand), a été imaginée par le mathématicien Leonard Euler au XVIIIe siècle. Elle permet de mieux comprendre la musique, et, pourquoi pas, d'aider les compositeurs.

En effet, lorsqu'on joue deux accords contigus sur ce plan, ils possèdent deux notes identiques sur trois, si bien que la transition de l'un à l'autre est très douce. On construit ainsi facilement des suites d'accords très harmonieux. *« On peut ainsi facilement concevoir un parcours enchaînant tous les accords, sans jamais jouer deux fois le même »,* note Moreno Andreatta. Un tel chemin est appelé un « parcours hamiltonien », c'est-à-dire dont on peut relier tous les sommets en une fois et une seule. La représentation en Tonnetz d'un extrait du deuxième mouvement de la *Symphonie n° 9* de Beethoven montre que le compositeur allemand a utilisé ce type de progression, en employant 18 des 24 accords possibles.

Pour notre « mathémusicien », ce type de contrainte est source d'inspiration. Il est d'ailleurs membre de l'Oumupo, l'Ouvroir de musique potentielle, sur le modèle de l'Oulipo (Ouvroir de littérature potentielle) fondé par Raymond Queneau. Cette approche par contraintes a été souvent utilisée par des compositeurs contemporains. Moreno Andreatta préfère l'appliquer aux chansons. Il a par exemple collaboré avec le chanteur Polo (Pierre Lamy) sur une chanson utilisant une seule fois tous les accords majeurs et mineurs.

Aider les musiciens

Ce dernier se souvient du moment où Moreno Andreatta l'a appelé pour monter un projet avec lui. *« Le courant est passé formidablement : c'est un latin, exubérant, volubile et drôle. Il est fantasque, mais avec une vraie rigueur, et c'est un gros bosseur. Il est passionné de chansons, et il connaissait les miennes. J'utilise moi aussi les formes contraintes, comme la poésie, pour écrire les textes de mes chansons. Le parallèle avec les contraintes musicales était donc tout à fait naturel. »* Polo a donc écrit des mélodies et des textes sur des suites d'accords suivant un parcours hamiltonien. Il les appelle « chansons hamiltoniennes ».

Ce goût pour la musique populaire, c'est peut-être ce qui caractérise le plus Moreno Andreatta, qui a grandi avec la chanson italienne. *« Ces musiques sont souvent plus élaborées qu'on ne le croit »*, souligne le chercheur. Son credo : aider les musiciens qui souhaitent aller au-delà des chansons simplistes de quelques accords.

Son entrée au CNRS l'avait un peu éloigné de la pratique musicale, mais, aujourd'hui, il y revient. *« Je travaille mon piano, je prends des cours de chant, je participe à des concours de mise en musique de textes poétiques... Faire de la musique m'aide à utiliser mon savoir-faire de chercheur. »* ■

CÉCILE MICHAUT

ZOOLOGIE

Une grive polluée et pourtant chassée

La grive à pattes (ou pieds) jaunes vit encore sur une poignée d'îles de la Caraïbe : à La Dominique, à Montserrat et, peut-être, à Sainte-Lucie, quoiqu'on ne l'y ait plus vue depuis des années. Toutes trois lui accordent le statut d'espèce intégralement protégée. Pas la Guadeloupe. L'Union internationale pour la conservation de la nature l'a classée dans sa liste des espèces *« vulnérables »*.

Mercredi 15 juin, Béatrice Ibéné, vétérinaire et présidente de l'Association pour la sauvegarde et la réhabilitation de la faune des Antilles (AFSA), est allée plaider sa cause auprès de Barbara Pompili. Elle a remis à la secrétaire d'Etat chargée de la biodiversité la pétition demandant le statut d'espèce protégée pour cet oiseau endémique, *« alors qu'on ne connaît rien de sa dynamique de reproduction »*. En trois semaines, le texte a réuni près de 4 500 signatures, dont celles d'ornithologues et de naturalistes de toute la Caraïbe, surpris par l'exception française.

Contaminée par les insecticides

Non seulement *Turdus lherminieri* est liée à un territoire limité, non seulement son habitat se fractionne à grande vitesse, grignoté par la croissance démographique, mais il pâtit aussi de la convoitise de chasseurs locaux. En principe, pas pour la manger, car la grive à pattes jaunes est contaminée par le chlordécone, cet insecticide organochloré, neurotoxique et cancérogène qui a été épandu sur les bananeraies jusqu'en 1993. Cette pollution chimique extrêmement persistante a touché une bonne partie des sols, des cours d'eau, puis l'environnement maritime autour de Basse-Terre, dont il est désormais interdit de consommer les poissons côtiers.

Même impropre à la consommation, la grive à pattes jaunes ne trouve pas la paix. S. MORIN

En 2011, préoccupée par le sort de la faune sauvage, l'AFSA avait fait pratiquer des tests sur la grive à pattes jaunes et sur la tourterelle à queue carrée, qui se sont révélés positifs pour l'une et l'autre. L'association pensait alors tenir une bonne raison pour qu'on les laisse en paix. Pourtant, une saison de chasse après l'autre, les préfets signent les arrêtés autorisant de tirer sur la grive.

Par deux fois, en 2014 et 2015, les défenseurs de la nature ont obtenu du tribunal administratif de Basse-Terre l'annulation des arrêtés fixant les modalités de chasse. Qu'à cela ne tienne, une nouvelle autorisation préfectorale est en projet : elle fixe les dates de la prochaine saison du 1er novembre 2016 au 1er janvier 2017, limite les captures à quatre grives au maximum par chasseur et par jour, sans dépasser 4 500 *« pièces »* au total.

En juin 2015, la préfecture indiquait que ce contingent représentait *« 10 % de la population totale estimée en Guadeloupe »*. Un an plus tard, l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) publiait un communiqué situant le nombre de grives entre *« 46 000 et 49 000 couples matures »,* soit plus du double du décompte préfectoral...

Emilie Arnoux, du Laboratoire de biogéosciences de l'université de Bourgogne, a consacré sa thèse au *« cas problématique »* de la grive à pattes jaunes. Les connaissances à son sujet *« restent très fragmentaires »,* en particulier sur sa répartition. *« La Guadeloupe* (...) *serait l'une des deux îles à abriter des effectifs notables. Cela souligne la responsabilité de ce territoire en matière de conservation »*, écrit la chercheuse.

« Des recensements de l'ONCFS montrent qu'il n'y a pas davantage de grives à l'intérieur du parc national où elles sont à l'abri qu'à l'extérieur. Tant qu'on ne peut pas mettre en évidence que la chasse a un impact sur leur nombre, nous n'avons pas à prendre parti », estime Pascale Faucher, chef du service des ressources naturelles à la direction de l'environnement de Guadeloupe, rappelant au passage que la liste des espèces chassables dépend du ministère de l'écologie. ■

MARTINE VALO