



science & médecine

Le Monde

Les ondes gravitationnelles secouent l'astrophysique

Vue d'artiste de la fusion de deux trous noirs, représentant ceux détectés par LIGO, le 26 décembre 2015. LIGO/T. PYLE

En 1916, Albert Einstein prédisait l'existence de ces témoins de la déformation de l'espace-temps. Plus de cent ans plus tard, environ 250 ondes gravitationnelles ont déjà été détectées. Retour sur les origines de cette découverte qui suscite l'enthousiasme des astrophysiciens

DAVID LAROUSSE

En annonçant, le 11 février 2016, la première découverte d'un signal extraterrestre d'un nouveau type, observé dans deux détecteurs aux États-Unis, le millier de physiciens auteurs de l'exploit affirmaient ouvrir une nouvelle fenêtre sur le cosmos. Promesse tenue. On connaît la large gamme des rayonnements électromagnétiques : rayons X, lumière visible, ultraviolet, infrarouge, radio, gamma... qui révèlent étoiles, galaxies ou planètes, et en décortiquent aussi les compositions et les évolutions. On connaît également les neutrinos, particules fugaces provenant du cœur de réactions violentes des étoiles ou autres cataclysmes violents. Désormais, à leurs côtés, il faudra compter sur de nouvelles ondes, dites « gravitationnelles ».

Elles sont le témoin de déformations de l'espace-temps causées par des mouvements d'objets très massifs et compacts comme les trous noirs, par définition invisibles, faute de rayonnement électromagnétique. Ces ondes sont des messagères cruciales pour comprendre l'histoire des galaxies. Elles renseignent sur leurs sources ou sur l'importance du processus de fusion-destruction-créeation qui leur donne naissance. Elles informent aussi sur les débuts de l'Univers tout autant que sur son avenir, c'est-à-dire sa vitesse d'expansion. Elles permettent également de tester la solidité de la relativité générale dans des situations extrêmes.

« C'est une astronomie fantastique. Cent ans après la prédiction d'[Albert] Einstein [qui a eu lieu, en réalité, en 1916] de l'existence de ces ondes dans le cadre de la relativité générale, nous avons rendu visibles ces choses invisibles, salue Marica Branchesi, professeure à l'Institut des sciences du Gran Sasso, en Italie. Ces ondes n'interagissent avec presque rien et sont donc difficiles à détecter. Mais si on y arrive, alors cela veut dire que nous sommes sensibles à des choses qui ont voyagé longtemps. » « Nous sommes comme Galilée avec sa lunette. On a de nouveaux instruments pour découvrir de nouveaux objets », complète Simone Mastrogiovanni, chercheur à l'Institut national de physique nucléaire italien.

L'enthousiasme n'est pas surjoué. Au moment où vous lirez ces lignes, près de 250 ondes gravitationnelles auront été détectées. Il y en a eu 90 lors des trois premières campagnes menées depuis 2015. Et près de 160 « candidates » lors de la quatrième campagne, commencée en mai 2023. C'est

seulement à l'été 2025 que ces observations seront confirmées, lors de la publication du nouveau catalogue, mais il est probable que peu disparaissent d'ici là.

D'une onde toutes les deux à trois semaines, détectée par trois installations, deux aux États-Unis (Ligo) et une en Europe, Virgo, en Italie, on passe à plusieurs ondes découvertes par semaine. Et même trois en une seule journée, le 18 novembre 2023, un record. « C'est comme pour les anciens numéros de téléphone, on a été obligés de changer notre nomenclature et d'ajouter six chiffres aux six habituels correspondant à la date », indique Eric Chassande-Mottin, chercheur CNRS au Laboratoire astroparticules et cosmologie.

Dans le sillage de ces découvertes, les techniques d'analyse doivent suivre. Grâce aux méthodes statistiques d'apprentissage automatique introduites depuis la campagne de mai 2023, des analyses qui duraient des heures se font en quelques secondes. « Mais il faut encore convaincre les astrophysiciens, car ces méthodes sont un peu obscures par rapport aux méthodes éprouvées », remarque Eric Chassande-Mottin.

« Nous devons montrer que c'est une science à part, transversale, qui demande des profils hybrides, forts en analyse de données, en techniques d'observations, en modèles... On doit encore construire cette nouvelle discipline », décrit Sarah Antier, astronome de l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, qui a lancé Grandma, un réseau international d'utilisateurs de télescopes, pour compléter les observations des ondes gravitationnelles.

➔ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

Des Bororo confrontés à la collection de Lévi-Strauss

Une délégation de cette population autochtone du Brésil a pu examiner au Musée du quai Branly les objets rapportés par le couple il y a près de quatre-vingt-dix ans

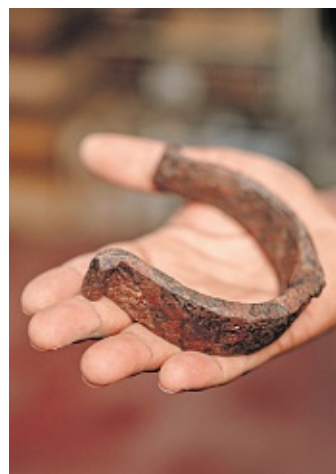
PAGE 2



La danse, en appui de la psychiatrie

Reportage à Lyon, où l'hôpital Le Vinatier travaille avec la Maison de la danse pour accompagner des jeunes ayant connu un épisode psychotique

PAGE 3



Une nouvelle exploration de la traite négrière au Sénégal

Des archéologues sénégalais travaillent à « décoloniser » l'historiographie de la traite des esclaves

PAGE 8

Les Bororo du Brésil réveillent la collection Lévi-Strauss

ANTHROPOLOGIE - Une délégation du peuple autochtone a examiné, à Paris, des objets collectés par le couple de Français lors de ses expéditions

Musée du quai Branly, mercredi 9 octobre. Dans l'antre des réserves ethnographiques se tient une rencontre d'exception. Onze personnes, gants bleus et blouses blanches, ont le nez rivé sur un trésor : une dizaine d'objets collectés il y a près de quatre-vingt-dix ans, au Brésil, par le célèbre anthropologue français Claude Lévi-Strauss et son épouse Dina.

Ornements de tête, pendants d'oreilles, flûte cérémonielle, flèches... Exhumés du passé, tous ces objets rayonnent encore de leurs couleurs, restées extraordinairement vives. Telle cette parure de cheveux, ornée de plumes et de duvet d'arara (ara rouge, ce grand perroquet coloré vivant dans les forêts tropicales américaines), collés sur une armature en bois. Ou encore cet étui de plumes, « tressé par des femmes à partir de feuilles de palmier », précise Neiva Aroereauto, une femme bororo de 39 ans, artisane et cheffe de village.

Les centaines d'objets rassemblés par les époux Lévi-Strauss, entre novembre 1935 et mars 1936, proviennent de cette population autochtone, les Bororo, originaire de l'Etat du Mato Grosso, dans le centre-ouest du Brésil. Elle y vit toujours aujourd'hui, parquée dans quatre réserves, regroupant 1800 personnes. En 1980, ils étaient trois fois moins nombreux – mais leur effectif atteignait environ 10 000 individus à la fin du XIX^e siècle.

Queue de singe

Du 6 au 12 octobre, une délégation de cinq Bororo est venue du Brésil, sur invitation du musée, pour consulter ces objets fabriqués par leurs ancêtres, il y a presque un siècle. Autour d'eux, cinq ethnologues ou étudiants, et le directeur du département de la recherche et de l'enseignement du musée, Benoît de L'Estoire.

Maintenant, l'assemblée examine une queue de singe parée, elle aussi, de plumes d'ara bleues et rouges. « Cet objet aurait dû être réalisé avec une queue de jaguar, mais nos ancêtres n'en ont sans doute pas trouvé », estime Ismael Atugoreu, chef de culture bororo et chanteur cérémoniel. Le couple d'anthropologues en était-il informé ? Dans ses notes de terrain, les « carnets nambikawara », conservés à la Bibliothèque nationale, Claude Lévi-Strauss décrit l'objet : il s'agit, note-t-il, d'une « queue réalisée en fourrure de singe ». Les Bororo ne lui ont pas menti.

Qu'attendaient de ce dialogue, au juste, les deux parties ? « Nous voulons réveiller notre culture endormie par la colonisation », explique Ismael Atugoreu. Il s'agit, aussi, de « mieux comprendre ces objets, sur le plan matériel et symbolique », selon Benoît de L'Estoire. « Dans l'esprit d'une double collaboration, avec les Bororo et avec nos collègues de l'université de Sao Paulo », ajoute-t-il.

Autre enjeu, pour la délégation : retrouver des savoir-faire perdus. « Nos anciens sont partis avec une partie de leurs connaissances, se désole Majur Traytowu, artisane bororo. Je voulais ramener ce savoir dans notre communauté, et y refabriquer ces objets. » Perpétuer et transmettre la tradition, à travers les objets et les chants, est un puissant



La cheffe de village Neiva Aroereauto examine une épingle à cheveux marquée aux éléments de son clan, au Musée du quai Branly, à Paris, le 9 octobre. JOAO KELMER

moteur. « Je tiens à remercier Claude Lévi-Strauss pour être venu à la découverte de notre peuple, ajoute Bosco Kurireu, chanteur cérémoniel et maître de culture bororo. Et pour avoir conservé ces ornements qui témoignent de notre culture. »

Il existe, cependant, un malentendu au sujet de cette culture : c'est le nom même de « Bororo ». « Notre peuple se nomme en réalité "boe", ce qui signifie les personnes humaines, raconte Antônio Jukureakireu, chanteur cérémoniel et enseignant, ancien chef de village. Quand les premiers Blancs sont arrivés [des orpailleurs portugais, au XVII^e siècle], nous les avons amenés sur la grand-place de nos villages, dans le patio où se tiennent nos cérémonies. Comme ils entendaient sans cesse le nom de ce patio, le "bororo", ils ont cru qu'il s'agissait du nom de notre peuple. »

Sur la culture boe, l'enseignant est intarissable. « Nos villages sont organisés autour de la grande maison des hommes, le "baito", poursuit-il. Une structure sophistiquée qui reflète l'organisation de la société. « Le village bororo est semblable à une roue de charrette dont les maisons familiales dessinaient le cercle, les sentiers, les rayons ; et au centre de laquelle la maison des hommes figurerait le moyeu », décrit ainsi Claude Lévi-Strauss dans *Tristes tropiques* (Plon, 1955).

Arrêtons-nous un instant sur cette structure. Autour du baito, les huttes des femmes forment un cercle. Toute la société boe s'organise autour de huit clans, tous matrilineaires : les biens matériels, les maisons, les noms de famille, les prérogatives sont transmis selon le lignage maternel.

« Le bororo se trouve à l'est de la maison des hommes », raconte encore Antônio Jukureakireu. Ce patio ovale joue un rôle central dans la vie de la société. C'est là qu'ont lieu les chants, les cérémonies importantes et surtout les rites funéraires. Lors de ce rituel, « la famille du mort confectionne une grande coiffe, le "pariko", poursuit l'enseignant. Elle la présente au village, puis la confie au père des âmes [un chaman], qui la pose sur la tête du représentant du mort. »

« Fortifier l'identité des jeunes »

Le pariko, cette coiffe spectaculaire est l'emblème le plus fameux des Boe. « J'en ai acquis une pour le Musée de l'homme en échange d'un fusil, et après des négociations qui se prolongèrent pendant huit jours », raconte Claude Lévi-Strauss. Cette prodigieuse parure se trouve aujourd'hui au Musée du quai Branly. Elle a, au vrai, perdu de sa superbe : les mites l'ont dévorée. Jeudi 10 octobre, elle faisait toutefois l'objet d'un « travail de détective »,

relève Majur Traytowu. Les Boe ont retrouvé, d'après le motif de la parure, le clan qui l'avait produite : Bakoro Ecerae.

Les Boe ne revendiquent pas de récupérer cette collection. « Parce qu'ils avaient créé des copies modifiées de leurs objets cérémoniels pour pouvoir les vendre », explique Leandro Varison, anthropologue au Musée du quai Branly.

« Cela me bouleverse d'être ici, témoigne encore Antônio Jukureakireu, livrant un plaidoyer poignant. Au Brésil, nos rites et notre culture sont mal compris. Nous sommes confinés dans des territoires indigènes trop petits. » Cette collection, rappelle-t-il, provient d'un village que les Boe ont perdu dans les années 1950, Kejari, lieu qui subissait déjà l'attaque des maladies apportées par les Blancs. « Très peu de Boe ont survécu, ce qui a facilité notre expulsion », ajoute-t-il.

« Si nous perdons notre culture, nos danses et nos chants, nos coutumes alimentaires... et surtout notre spiritualité, cela ouvre la porte à toutes les situations de détresse », se désole-t-il. Son plus grand défi, en tant qu'enseignant, est de conduire la jeunesse. Ce voyage, espère-t-il, pourrait permettre de « fortifier l'identité [des] jeunes, pour qu'ils soient fiers d'appartenir à la culture boe ». ■

FLORENCE ROSIER

La sécheresse favorise la création d'une espèce de pinson

ORNITHOLOGIE - Une équipe américaine a montré comment l'environnement peut conditionner l'évolution de passereaux des Galapagos

On l'a tous appris en classe : l'évolution des espèces est guidée par le temps long. Il va falloir sinon réviser, du moins enrichir notre connaissance : deux chercheurs de l'université du Massachusetts, à Amherst, viennent de montrer, dans la revue *Science*, le 10 octobre que six années peuvent suffire à créer une nouvelle espèce d'oiseaux, pour peu que celles-ci soient accompagnées d'une grande sécheresse. De l'absence d'eau à la transformation des chants nuptiaux, essentiels à l'accouplement, ils ont même montré le mécanisme qui conduit à cette « spéciation écologique ».

Le modèle sur lequel ils ont travaillé n'est pas n'importe lequel : le pinson des Galapagos, connu sous le nom de pinson de Darwin. Cette appellation regroupe en réalité quatorze espèces, que le célèbre naturaliste anglais rapporta pour

l'essentiel lors de son voyage en Amérique du Sud dans les années 1830. C'est en étudiant leurs becs, sur le conseil de son ami ornithologue John Gould, que le savant établit une partie des bases de sa théorie de l'évolution, notamment l'importance de l'isolement géographique dans la formation de nouvelles espèces. Mais comment les pinsons avaient-ils évolué, sous quelle pression ou par quel hasard : l'affaire restait assez floue, en vérité.

Les époux Rosemary et Peter Grant ont repris le flambeau à la fin du XX^e siècle. Pendant près de quarante ans, le couple de chercheurs de l'université de Princeton a suivi les volatiles de l'îlot volcanique de Daphne Major, dans l'archipel des Galapagos. Ils les ont mesurés sous toutes les coutures, bagueés, ont prélevé leur sang et étudié leur généalogie. Ils ont ainsi établi que l'arrivée d'un seul indi-

vidu venu de l'extérieur avait abouti à créer une nouvelle espèce en trois générations. Ils ont encore montré que les périodes de sécheresse obligeaient les oiseaux à manger des graines plus dures, favorisant ainsi les oiseaux à becs plus épais.

« Fantômes du futur »

Quelle conséquence pouvaient entraîner ces variations anatomiques ? Jeffrey Podos, de l'université du Massachusetts, a montré, en 2001, que l'évolution des becs s'accompagnait d'un changement dans la structure des chants nuptiaux. « Quand les becs s'élargissent, les oiseaux ne sont plus capables de les ouvrir et les fermer aussi rapidement lorsqu'ils chantent, ce qui conduit à des mélodies plus simples, des répétitions de notes plus lentes, une bande de fréquence plus réduite », détaille le professeur de biologie.

Une question essentielle restait toutefois sans réponse : ce changement musical influençait-il réellement la capacité des oiseaux à se reconnaître et à s'accoupler ? C'est précisément ce que viennent de démontrer le chercheur américain et sa collègue Katie Schroeder. Pour cela, ils n'ont pas étudié les générations passées, mais celles à venir, « des fantômes du futur ».

Plus précisément, ils ont repris les données de 2001 et les paramètres d'évolution alors observés et les ont appliqués aux chants des oiseaux actuels. Ils ont ainsi pu simuler ce que serait le chant d'un pinson après une année, trois années ou six années de sécheresses successives. Enfin, dans une expérience dite de « playback », ils ont fait entendre ces mélodies modifiées à des pinsons d'aujourd'hui.

Le résultat est saisissant. Un an ou trois ans de sécheresse ne

change qu'à la marge le comportement des oiseaux. Soumis aux chants reconstruits de rivaux potentiels, les mâles continuent de s'envoler aussi rapidement et à la même distance qu'à l'écoute d'un pinson d'aujourd'hui. En revanche, leur réponse est bien moins intense face à la simulation de six années sans eau. Comme s'il ne s'agissait plus d'un rival.

Et les femelles dans tout ça ? « La réponse la plus importante dans ce domaine » leur appartient, soulignent les chercheurs. Seraient-elles aussi difficiles ? « Elles se montrent en général plus discriminantes que les mâles dans leur évaluation des signaux vocaux », insistent-ils, car les conséquences d'une erreur sont beaucoup plus sérieuses pour elles.

Ils ajoutent que dans leur simulation, ils n'ont fait évoluer que la vitesse des trilles et la fréquence vocale. D'autres modifications

du chant, ici non modélisées, pourraient amplifier encore le phénomène. Sans compter les indices visuels associés à la taille du bec. Cinq, quatre ou même trois années pourraient-elles suffire ?

Restait un ultime détail à vérifier : comparer cet effet écologique à la « dérive culturelle » du chant (un petit n'imité pas parfaitement ses parents) et à « l'adaptation acoustique », par laquelle le chanteur tient compte de son milieu naturel, forêt ou terrain découvert par exemple, deux phénomènes réputés pour nourrir la spéciation. Là encore, le résultat des simulations montre l'importance du facteur écologique... « chez les pinsons des Galapagos », tempère Jeffrey Podos. « Il faudrait regarder si les mêmes résultats se retrouvent dans d'autres espèces », ajoute-t-il. Un appel du pied aux chercheurs de tous les pays ! ■

NATHANIEL HERZBERG

La danse comme appui aux soins en psychiatrie

SANTÉ MENTALE - A Lyon, un projet chorégraphique accompagne le suivi de jeunes après un premier épisode psychotique

LYON - envoyée spéciale

Ce soir d'été, la salle de la Maison de la danse de Lyon est pleine. A l'affiche, *Partitions d'instincts*, du chorégraphe et danseur Louis Combeaud. Vêtus de noir et de blanc, une dizaine de danseurs forment une ligne, puis avancent doucement, sur une musique de Laurie Anderson.

Parmi eux, des jeunes de 18 à 25 ans, suivis après un premier épisode psychotique, mais aussi une sœur, un meilleur ami et quatre soignants, dont trois infirmières « case managers » (du personnel référent) et le psychiatre Emmanuel Monneron, responsable du centre d'accueil thérapeutique à temps partiel du pôle Centre, à l'hôpital Le Vinatier, à Bron (Rhône). Depuis 2017, il organise des projets « Danse et santé mentale » avec la Maison de la danse de Lyon.

« Il s'agit de proposer à des soignants et à des patients de participer à une aventure collective, hautement citoyenne, où chacun a sa place », décrit Emmanuel Monneron, également danseur et chorégraphe. « Lorsqu'on prend part à un projet qui amène à découvrir des spectacles, partager avec d'autres personnes, prendre place sur scène face à un public, on contribue à la vie d'une communauté, poursuit le psychiatre. C'est un projet inclusif qui vise aussi à lutter contre les discriminations. »

Improvisations et lâcher-prise
Ici, les jeunes ont été pris en charge par les équipes PEP'S (Programme d'intervention structuré pour les premiers épisodes de psychose), avec un suivi qui dure trois ans. En France, au moins 15 000 jeunes présentent chaque année un épisode psychotique, d'après le Groupe hospitalier universitaire psychiatrie & neurosciences de Paris. Il se caractérise par une perte de contact avec la

réalité, dont la durée peut varier, avec des symptômes comme des hallucinations, une perte d'envie, de la désorganisation... et qui affecte les pensées, les émotions et le comportement.

Lors de l'une des répétitions qui précèdent le spectacle, à laquelle *Le Monde* a assisté – elles ont duré un an –, par groupe de deux ou trois, certains sont invités à fermer les yeux, les autres les font bouger, puis les rôles s'inversent. Les corps se déploient peu à peu et se laissent aller aux improvisations.

La veille, ils ont visionné le spectacle *Set and Reset*, de la danseuse et chorégraphe Trisha Brown (1936-2017), qui a inspiré Louis Combeaud. Il planche sur un mémoire consacré à la pédagogie de la danse. « J'ai travaillé sur le lâcher-prise, pour montrer que la perte de contrôle n'est pas forcément catastrophique et que ça peut être du jeu, du plaisir. La danse est une manière de se révéler à l'autre pour se découvrir soi. » Les corps s'ouvrent, apaisés, portés par la présence de l'autre. « C'est votre relation qui est le socle », leur dit Louis Combeaud.

Pour Nizar, étudiant de 25 ans, c'est « une super expérience, qui [l']a aidé à prendre conscience que, même en étant malade, on arrive à faire des choses » : « Ça renforce la confiance en soi, ça ne m'a apporté que du positif. » Lui qui vient de terminer le programme PEP'S juge qu'il « est un peu tôt pour dire » si ça lui a permis de combattre son trouble. Ce qui est certain, c'est que « ça [l']a aidé à [s]e remettre dans la vie quotidienne, à revoir des gens » : « C'est valorisant. »

Nizar a connu un épisode psychotique en 2019 qui l'a conduit à une hospitalisation de près de quatre semaines, puis il a été pris en charge au sein du PEP'S. Diagnostiqué bipolaire en 2021, il n'a pas hésité quand on lui a proposé ce projet artistique. Il a même in-

vitité sa sœur Nor à l'accompagner. Elle qui avait toujours rêvé de danse et n'en avait jamais fait.

Elle concède avoir été plutôt stressée : « Mais Nizar était là pour moi, danser ensemble nous a rendus encore plus proches. On était là, sans ces notions de maladie ni de handicap », poursuit Nor. « Ce n'est pas facile d'avouer à soi-même qu'on a une maladie mentale, mais ce projet prouve qu'on nous inclut », dit Nizar. Cette expérience change aussi la relation soignant-patient. « Ça enlève de la distance », dit Isabelle Diter, infirmière « case manager », qui prend part au spectacle. Pour les soignants aussi, c'est une aventure. Certains peuvent être quelque peu déstabilisés au début, mais les barrières tombent vite.

Effet indéniable

« Ça m'a beaucoup aidée », dit Sofia, en fin de parcours du PEP'S, après une hospitalisation en 2020 pour un problème dont l'étudiante de 24 ans préfère ne pas parler. « Au début, j'appréhendais un peu, car j'étais avec des gens que je ne connaissais pas, mais j'ai très vite apprécié. Parfois, je n'avais pas envie d'y aller, parce que je me sentais mal ou triste, mais ça allait mieux après les répétitions. Oui, la danse fait du bien. »

Danser n'est pas anodin. Pour Isabelle Diter, l'effet thérapeutique est indéniable. Des études ont d'ailleurs mis en évidence les bienfaits de la danse sur la santé mentale. Une méta-analyse publiée en janvier dans *Sports Medicine* a montré les effets positifs de celle-ci sur le bien-être psychologique et les capacités cognitives. Déjà, en 2016, une équipe de médecins belges écrivait dans la revue *Médecine interne* que « la danse offrait de nombreux bénéfices d'ordre musculaire, articulaire, métabolique, cardio-pulmonaire, cardio-vasculaire, psychologique et social ».

Un premier épisode psychotique n'est pas forcément annonciateur d'une maladie chronique, d'autant plus que le diagnostic n'est pas toujours simple à établir, concèdent les soignants. Toutefois, une chose est sûre : « Prendre en charge précocement permet d'éviter, dans certains cas, de faire un autre épisode qui pourrait évoluer vers une maladie chronique », explique Emmanuelle Blanc, infirmière du PEP'S. Le chef du service de l'hôpital Le Vinatier, Frédéric Haesebaert, en est convaincu, comme il l'avait rappelé dans une tribune collective publiée dans nos colonnes en mars 2023 qui appelait notamment à une meilleure organisation de ces soins.

Cela passe par de la psycho-éducation. « Avec un psychiatre référent, on accompagne le jeune, s'il le souhaite, à l'université, pour trouver un logement, un emploi. Le but étant de bien connaître la personne qu'on accompagne afin qu'elle se sente en confiance et puisse nous parler librement de ses souhaits », explique Nadège Fuoco, infirmière du PEP'S qui participe au programme de danse. Nés au Canada, les programmes d'intervention précoces se développent en France.

Ainsi, selon Emmanuel Monneron, « on se penche sur les symptômes, mais aussi sur tout ce qui concerne la personne, son travail, ses études. Ce projet de danse n'est pas une thérapie, mais il s'intègre dans une démarche de réhabilitation psychosociale qui vise, à terme, le rétablissement ». Une prise en charge de longue haleine. ■

PASCALE SANTI

TÉLESCOPE

BIOLOGIE

Les cténophores peuvent fusionner pour vivre

Deux cténophores de l'espèce *Mnemiopsis leidyi* peuvent fusionner lorsque l'un est blessé. Des chercheurs d'Exeter (Royaume-Uni) et d'Okazaki (Japon) ont placé deux de ces cousins des méduses, préalablement

amputés, côte à côte. Ils ont constaté qu'une fois assemblés les deux individus synchronisent rapidement leurs contractions musculaires, puis marient leur tube digestif pour partager leur nourriture et fondent leur système nerveux. Pour les scientifiques, l'espèce serait dépourvue du « système d'allo-reconnaissance, qui permet de faire la distinction entre soi et les autres ».

(PHOTO : CAPTURE D'ÉCRAN VIDÉO/MARIANA RODRIGUEZ-SANTIAGO)
> Jokura et al., « *Current Biology* », 7 octobre.

70 500 nouveaux virus identifiés avec l'IA

Une équipe internationale de chercheurs a découvert 70 500 nouveaux virus, grâce à un algorithme d'intelligence artificielle qu'elle a développé. Ces virus à ARN ont été identifiés au moyen de la métagénomique, qui permet de recenser tous les génomes présents dans l'environnement. Bon nombre de ces nouveaux virus ont été découverts dans l'air, les sources chaudes et les cheminées hydrothermales au fond des océans.
> Hou et al., « *Cell* », 9 octobre.



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS



EXECUTIVE MASTER

Technologie • Innovation • Leadership

VOUS ÊTES CADRE DIRIGEANT ?

Rejoignez l'Executive Master de l'École polytechnique et vivez une expérience unique au cœur de l'innovation tout en continuant de travailler.



Découvrez
notre
formation

polytechnique.edu/executive-master

Rendre visible la science africaine

REVUES - Le continent est marginalisé dans le paysage académique

Plus de soixante ans après les indépendances, la production scientifique africaine demeure largement invisible dans le paysage académique mondial. C'est au travers d'articles publiés, en majorité, par les revues anglo-saxonnes d'« études africaines » que continue d'être décrite et perçue la situation du continent. Ce constat n'est pas nouveau.

La cure d'austérité imposée aux universités, dans le sillage des plans d'ajustement structurel des années 1980, a eu raison du dynamisme éditorial apparu dans de nombreux départements de recherche au moment où les pays reprenaient leur destin en main. A quelques exceptions près, comme en Afrique du Sud, cette réalité persiste.

La précarité financière, couplée à un accès aléatoire aux outils de communication, en particulier Internet, est un obstacle persistant à la création de revues pérennes. La priorité donnée par les établissements à la formation d'étudiants de plus en plus nombreux, au détriment de la recherche, ne favorise pas la production d'articles susceptibles d'être soumis à la publication.

Au-delà de ces faiblesses, les normes de publication et de référencement fixées par les quelques grandes maisons d'édition du Nord participent de cette marginalisation. C'est ce que s'attache à montrer la revue trimestrielle *Global Africa* dans son numéro de juillet, consacré aux défis de l'édition scientifique sur le continent. Elle explore également les pistes en faveur d'un rééquilibrage.

Créer son propre index

Les revues africaines ont d'emblée été exclues du premier index mondial de citations, Science Citation Index, créé en 1964. Aujourd'hui, Web of Science et Scopus – deux bases de données d'articles scientifiques – continuent pour faire leur sélection de privilégier les revues déjà citées par celles composant l'index.

En 2023, sur plus de 30 000 revues présentes dans Web of Science, seulement 60, si on exclut l'Afrique du Sud, étaient publiées en Afrique subsaharienne, soulignent David Mills (université d'Oxford) et Toluwase Asubiero (université d'Afrique du Sud) dans un article. Ils s'interrogent sur le besoin pour la recher-

che académique africaine de créer son propre index de citations.

Le mouvement en faveur d'une science ouverte faisant la promotion de publications en libre accès suscite l'espoir. Créée en 2022 avec le soutien de l'Agence française de développement, *Global Africa*, portée par l'université Gaston-Berger, à Saint-Louis, au Sénégal, publie quatre numéros par an en swahili, anglais, français et arabe.

L'histoire de *The African Review*, fondée en 1969 par l'université de Dar es Salaam, en Tanzanie, montre aussi le cas d'une coopération réussie avec un éditeur du Nord, le néerlandais Brill. Dans le panorama de l'édition africaine, il n'y a pas de modèle unique pour donner plus de portée à la voix des chercheurs continentaux.

La crédibilité d'une revue reste, pour l'heure, soumise à cette indexation tant critiquée. Comme le confesse la rédactrice en chef de *Global Africa*, Mame-Penda Ba, qui admet, devant la joie éprouvée lors de l'indexation, en août, de *Global Africa* dans le Directory of Open Access Journals, sa propre « contradiction » face à ses rêves d'émancipation. ■

LAURENCE CARMEL

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

Pour l'heure, la moisson est belle, en secousses, en surprises, mais également en nouvelles questions. Le but n'est pas en effet d'épingler, sur un tableau de chasse, des gravitons, la particule qui porte les ondes, comme on collectionnerait les papillons. Retour sur les premiers pas de l'astronomie gravitationnelle.

L'an I des ondes

Il y a plus de 1,3 milliard d'années, quand les premiers organismes vivants eucaryotes apparaissent sur Terre, un ballet cataclysmique a eu lieu dans le ciel, en direction de l'hémisphère Sud. Deux trous noirs, massifs comme une trentaine de soleils, mais sept mille fois moins larges, se tournent autour à très grande vitesse. Environ la moitié de celle de la lumière. Ils se frôlent à environ 500 kilomètres l'un de l'autre, à raison de plus de soixante-dix tours par seconde. Et, en un clin d'œil, deux dixièmes de seconde, ils disparaissent.

A la place, un autre trou noir qui, telle une grosse cloche que l'on vient de secouer, continue de vibrer. Sa masse inférieure aux soixante-six soleils que représentait la somme de ses deux parents a fusionné. La différence, d'environ trois masses solaires, s'est transformée en une énergie colossale, bien plus que celle rayonnée par toutes les étoiles et les galaxies nous entourant. Telle un caillou agitant la surface d'un étang calme, le choc est suffisant pour déformer l'espace-temps. Onde ainsi formée, filant à la vitesse de la lumière, a atteint la Terre, le 14 septembre 2015, recueillie par les bras lasers de quatre kilomètres de long des deux détecteurs américains. La nouvelle fenêtre sur l'Univers venait de s'ouvrir.

«*Le signal était trop parfait. On craignait le "fake", comme en 2010, lorsqu'une alerte s'est retrouvée fausse. Donc, la prudence était de rigueur*», se souvient Francesco Pannarale, professeur à l'université Sapienza de Rome, qui poursuit : «*Le 11 février 2016, après les vérifications et le stress à garder tout cela secret, même pour nos proches, l'annonce a été un moment très émouvant.*» Le prix Nobel de physique consacra, en 2017, les trois pionniers de cette aventure, les Américains Rainer Weiss, Barry C. Barish et Kip S. Thorne.

Immédiatement, deux premières leçons sont tirées. Les ondes gravitationnelles sont détectables sur Terre. Un exploit qui soulevait les sarcasmes quelques décennies plus tôt. Et les trous noirs peuvent disparaître, en un accouplement destructeur et bref. Si «*dans l'espace, personne ne vous entend crier*», expression que l'on doit au film *Alien* (1979), cette fois la collision a fait grand bruit, sous forme d'une accélération de fréquence vers les aigus, au moment du rapprochement fatal.

Le feu d'artifice

Ce jeudi 17 août 2017, c'est le début de l'après-midi en Europe. Alerte. Les deux détecteurs américains LIGO ont été perturbés par un signal anormalement long, plusieurs secondes, contre une fraction de seconde en général, lorsque à des millions d'années-lumière deux trous noirs s'engloutissent. Les premières estimations tombent. Il s'agira de deux objets compacts, restes d'une étoile massive ayant explosé : des étoiles à neutrons. Une première. L'équivalent de tout notre Soleil ramassé dans un rayon de dix kilomètres. Une cuillère à café de cette matière pèserait plusieurs milliards de tonnes.

Contrairement aux trous noirs, il s'agit de vraie matière, des neutrons bien sûr, mais aussi des électrons, des protons, des quarks, excessivement comprimés. Et ça va tout changer.

1,7 seconde après l'alerte gravitationnelle, des télescopes spatiaux, Fermi et Integral, observent un sursaut de rayons gamma. A minuit, le télescope Swope du Chili voit une lueur nouvelle dans son champ, qui apparaît dans la galaxie NGC 4993. Neuf jours plus tard, une bouffée de rayons X est aussi captée en provenance de la même direction. Puis sept jours après, ce seront des ondes radio. Tous ces rayonnements sont liés à la présence de la matière des étoiles à neutrons qui se déchire, chauffe, se transforme...

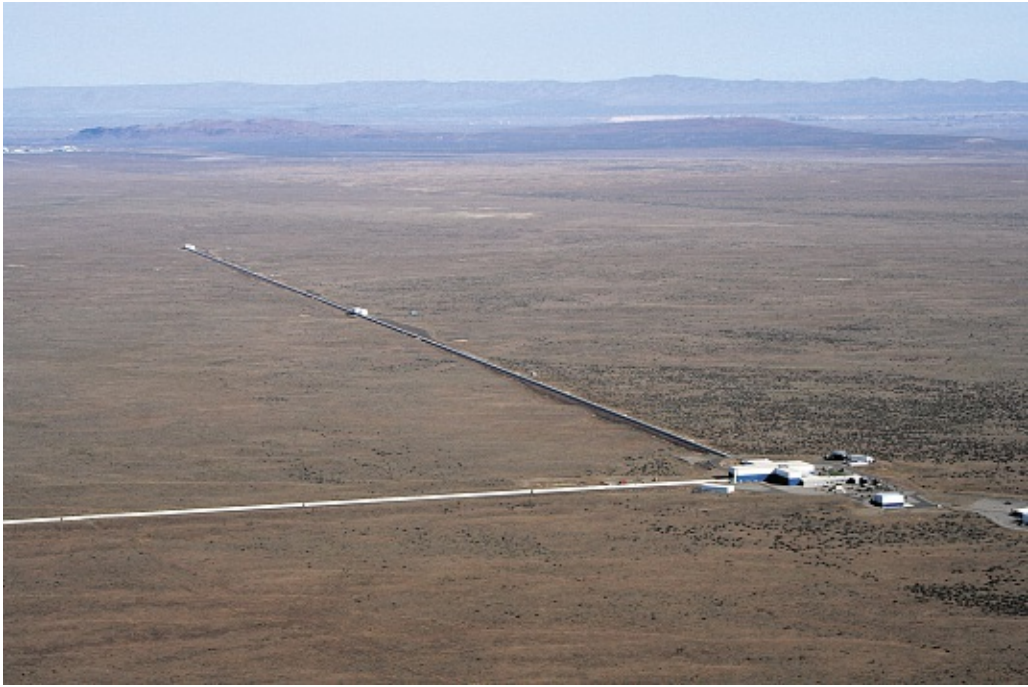
Au total, soixante-dix instruments auront été mis à contribution sur Terre et dans l'espace pour enregistrer ce feu d'artifice mêlant, pour la première fois, ondes gravitationnelles et ondes électromagnétiques. Seuls les neutrinos manqueront à l'appel des messages cosmiques. «*La veille, je venais d'atterrir en Italie, en provenance des Etats-Unis. J'étais encore "jet-lagé" et je pensais me reposer quand cet événement est arrivé. Ça a été le début de deux mois intenses de*

travail. Le jour, j'écrivais l'article résumant ces détections avec les Européens, et la nuit avec les Américains. Après l'annonce, mi-octobre, je suis tombé malade et j'ai pu dormir», se souvient Francesco Pannarale.

Mis à part l'onde de septembre 2015, l'événement baptisé «*GW170817*» est celui qui a le plus marqué les esprits. Plus de 1370 articles «*pre-prints*» (non révisés par les pairs) lui ont été consacrés sur le site Arxiv.org. Il faut dire que les informations apportées sont riches. Avec la simultanéité d'une détection gravitationnelle et électromagnétique, les chercheurs ont pu montrer que, comme prévu par la relativité générale, les déformations de l'espace-temps se propagent à la vitesse de la lumière.

Ils ont aussi éclairci leurs scénarios de fabrication d'éléments lourds que le fer, comme l'or ou le plomb. L'explosion d'étoiles massives – une supernova – forge «*facilement*» des éléments moins lourds que le fer, mais pour aller au-delà, il fallait un peu triturer les modèles.

Avec GW170817, une réponse alternative aboutit enfin, rendant concret le scénario de la kilonova, un phénomène mêlant fusion de neu-



Le site de détection de Hanford, dans l'Etat de Washington, aux Etats-Unis, le 2 mai 2008. CALTECH/MIT/LIGO LAB

trons, désintégration radioactive, chauffage, synthèse de noyaux... «*Mais nous avons encore du travail, car les informations sur la kilonova tirées des ondes gravitationnelles ou des rayonnements électromagnétiques sont encore en tension*», indique Sarah Antier. Et on ignore ce qu'il est resté de la fusion. Un trou noir, peut-être ?

Autre intérêt, une meilleure connaissance des étoiles à neutrons, dont les lois régissant le comportement de cette matière très compacte restent inconnues. «*L'étude des pulsars [des étoiles à neutrons tournant sur elles-mêmes et qui rayonnent des ondes radio] a mis quelques contraintes sur les équations décrivant cette matière. Mais avec les ondes gravitationnelles, c'est encore mieux*», estime Micaela Oertel, chercheuse CNRS à l'Observatoire de Strasbourg, qui analyse aussi des événements mixtes dont quatre ont été confirmés, avec une étoile à neutrons et un trou noir, mais sans contrepartie électromagnétique.

Autre apport, l'espoir de sortir d'une controverse de plusieurs années : à quelle vitesse les galaxies lointaines s'éloignent de nous ? Deux méthodes existent pour calculer cette constante de Hubble... mais ne sont pas d'accord entre elles. GW170817 et son feu d'artifice proposent une troisième voie utilisant cette «*si-rène brillante*», comme cette source de lumière a été baptisée. Dans cette observation rare, les ondes gravitationnelles, par leur intensité, donnent la distance à la source.

Et les ondes électromagnétiques indiquent le «*temps*» par la mesure du décalage de fréquence dû à l'éloignement de sources émettant ces ondes. Le rapport des deux fournit la vitesse cherchée qui... tombe entre celles des deux autres méthodes. Impossible de trancher encore, d'autant que cette mesure, sur un seul cas, est trop imprécise.

«*Nous sommes en ébullition, excités par ce que des événements multimessagers peuvent nous apporter*», lance Micaela Oertel. Mais, pour l'instant, «*on dirait que l'Univers n'est pas gentil avec nous !*», sourit Nicola Tamanini, chercheur CNRS au Laboratoire des deux infinis, à Toulouse, dans l'attente d'un éventuel deuxième feu d'artifice. «*Tous les jours, je dis, "don't panic", ça pourrait arriver encore*», rétorque Marica Branchesi. Pour la campagne en cours, les théoriciens estiment la probabilité de voir un couple d'étoiles à neutrons à presque 90 %, et un couple mixte, à presque 100 %. Avec ou sans lumière.

Les intrus qu'on n'attendait pas

Le 29 mai 2023, dernière détection officiellement validée par la collaboration LIGO-Virgo, un événement secoue les détecteurs, mais aussi les esprits. Un des membres du couple a une masse «*interdite*» de 3,6 masses solaires. Trop lourd pour être une étoile à neutrons, qui en théorie ne dépasse pas 2,5 masses solaires, trop léger pour un trou noir, prévu pour ne pas tomber sous les 5 masses solaires. L'autre membre est, lui, a priori une étoile à neutrons assez légère, de 1,4 masse solaire. Quatre ans auparavant, un autre intrus avait été trouvé, mais à 2,6 masses solaires, donc compatible avec certains modèles d'étoiles à neutrons.

L'hypothèse que cet intrus de 2023 soit un trou noir, vestige de ceux qui sont apparus au début de l'Univers, et qui aurait grossi petit à petit, n'est pas exclue. «*Certains théoriciens se demandent aussi si cet objet compact pourrait être un objet exotique, ni trou noir ni étoile à neutrons. Il y a des idées. Les gens sont très excités. Ce genre de situation est un terrain de jeu idéal pour tester des théories*», indique Francesco Pannarale.

Mais comme aucun autre signal d'origine électromagnétique n'a pu être corrélé à l'onde gravitationnelle, difficile de privilégier une hypothèse. Autre indice qui manque encore, la façon dont les objets tournent sur eux-mêmes, leur «*spin*». Selon les scénarios, ces derniers peuvent être alignés – ou pas – entre eux.

La quantité plutôt que la qualité

Ce qu'apporte cette nouvelle astronomie va au-delà des trophées d'espèces exotiques, rares, bizarres, jamais vues... C'est surtout de la statistique. Combien de trous noirs ou d'étoiles à neutrons fusionnent dans le ciel ? Combien de trous noirs massifs existe-t-il ? Combien de poids plumes ? Ce dénombrement est crucial pour raconter l'histoire de notre Univers, dont l'évolution semble rythmée par ces fusions, bien peu considérées jusqu'alors.

A cet instant, la distribution de masses des trous noirs interroge. Pour les plus «*légers*», on vient de voir que certains ont une origine et une nature inconnues. Mais pour les plus «*lourds*» aussi, quelque chose cloche. Aucun scénario classique n'explique leur présence. Selon ce dernier, les trous noirs dits «*stellaires*» ou «*intermédiaires*» naissent après l'explosion d'une supernova.

LA MÉCANIQUE ULTRASENSIBLE DES DÉTECTEURS

Bien qu'engendrées par des corps et des mouvements colossaux, les ondes gravitationnelles qui déforment l'espace-temps ont des conséquences très faibles, une fois arrivées sur Terre. Elles rallongent ou rétrécissent de seulement un millième de la taille d'un proton le trajet d'un rayon lumineux de 4 kilomètres. Pourtant, les physiciens ont su construire des détecteurs sensibles à ces si infimes déplacements.

Dans deux tunnels perpendiculaires longs de 4 kilomètres, des rayons lasers font des allers-retours. Ces trajets sont précisément réglés de façon que les rayons arrivent en même temps, au creux de ces deux «*bras*».

Mais si une onde gravitationnelle passe, elle dilate et contracte différemment les tunnels, si bien que l'équilibre initial est rompu.

Bras de 10 kilomètres

Les Américains ont ainsi construit deux détecteurs LIGO, à Hanford (Washington) et Livingston (Louisiane), à 1900 kilomètres l'un de l'autre, avec chacun des bras de 4 kilomètres. Les Européens ont construit Virgo, près de Pise en Italie, avec deux bras de 3 kilomètres, et GEO600 en Allemagne, un modèle réduit de 600 mètres de long.

Les Japonais ont rejoint, en 2023, la collaboration avec Kagra et ses bras

souterrains de 3 kilomètres, mais le tremblement de terre du 1^{er} janvier l'a contraint à l'arrêt. Un jumeau de LIGO est également en construction en Inde. Jour et nuit, vingt-quatre heures sur vingt-quatre, les détecteurs sont actifs, mais ils sont régulièrement arrêtés pour de longs mois afin d'améliorer leur sensibilité. Plus celle-ci augmente, plus les astronomes verront d'ondes, et plus ils pourront en repérer d'anciennes. Actuellement, ils en observent deux à trois par semaine.

La précision est telle qu'ils savent distinguer le passage d'une onde cosmique par rapport à une perturbation terrestre, mais ils ont dépassé aussi

une limite fondamentale. La lumière, même dans le vide, est soumise à des fluctuations d'origine quantique qui peuvent déséquilibrer le détecteur qui peut faire rater le passage d'une onde. En fauchant des faisceaux lasers subtilement, les physiciens sont parvenus à contrôler ces parasites quantiques.

La suite se prépare déjà avec, notamment, deux projets souterrains géants, Einstein Telescope en Europe et Cosmic Explorer aux Etats-Unis. Deux sites, aux Pays-Bas et en Italie, sont en compétition pour accueillir l'installation européenne dotée de bras de 10 kilomètres. Elle est prévue pour 2035. ■

D.L.

UN PROJET SPATIAL GIGANTESQUE

Si l'on accole l'expression « projet fou » à des installations scientifiques impressionnantes comme le Grand Collisionneur de hadrons – l'accélérateur de particules souterrain de 27 kilomètres de long où a été découvert le boson de Higgs – ou le Super-Kamio-kande – un détecteur de neutrinos lui aussi enfoui et contenant 50 000 tonnes d'eau pure –, comment qualifier LISA ?

Piloté par l'Agence spatiale européenne (ESA), avec une participation américaine, ce premier détecteur spatial d'ondes gravitationnelles, censé partir dans l'espace vers 2035, flirte avec la folie : trois vaisseaux identiques volant de conserve et formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté. Avec pour tâche de mesurer des déformations de l'espace-temps de quelques dizaines de picomètres. Rappelons qu'un picomètre est un milliardième de millimètre...

Pour saisir l'exploit technique que LISA représente, décrivons son principe de fonctionnement. Chaque vaisseau est une sorte de coffre-fort contenant deux « lingots » faits d'un alliage d'or et de platine et flottant en impesanteur. Et chacune de ces deux « masses d'épreuve », pour reprendre le terme scientifique, est reliée au lingot d'un des deux autres satellites par des lasers synchronisés, permettant de mesurer la distance qui les sépare avec la précision diabolique requise.

« Une partie du défi consiste à s'assurer que les changements mesurés sont dus aux ondes gravitationnelles et non au "bruit ambiant" comme les variations des champs magnétiques, le rayonnement solaire et les particules électriquement chargées émises par le Soleil, les vibrations du vaisseau spatial, les changements de température et un très grand nombre d'autres effets similaires », explique l'Allemand Oliver Jennrich, spécialiste des ondes gravitationnelles à l'ESA et qui travaille sur le projet. Le choix de l'or et du platine rend les masses d'épreuve très denses et minimise leur sensibilité aux champs magnétiques. La faisabilité de l'expérience a par ailleurs été testée – avec succès – par la mission LISA Pathfinder entre décembre 2015 et juillet 2017.

Bruit de fond

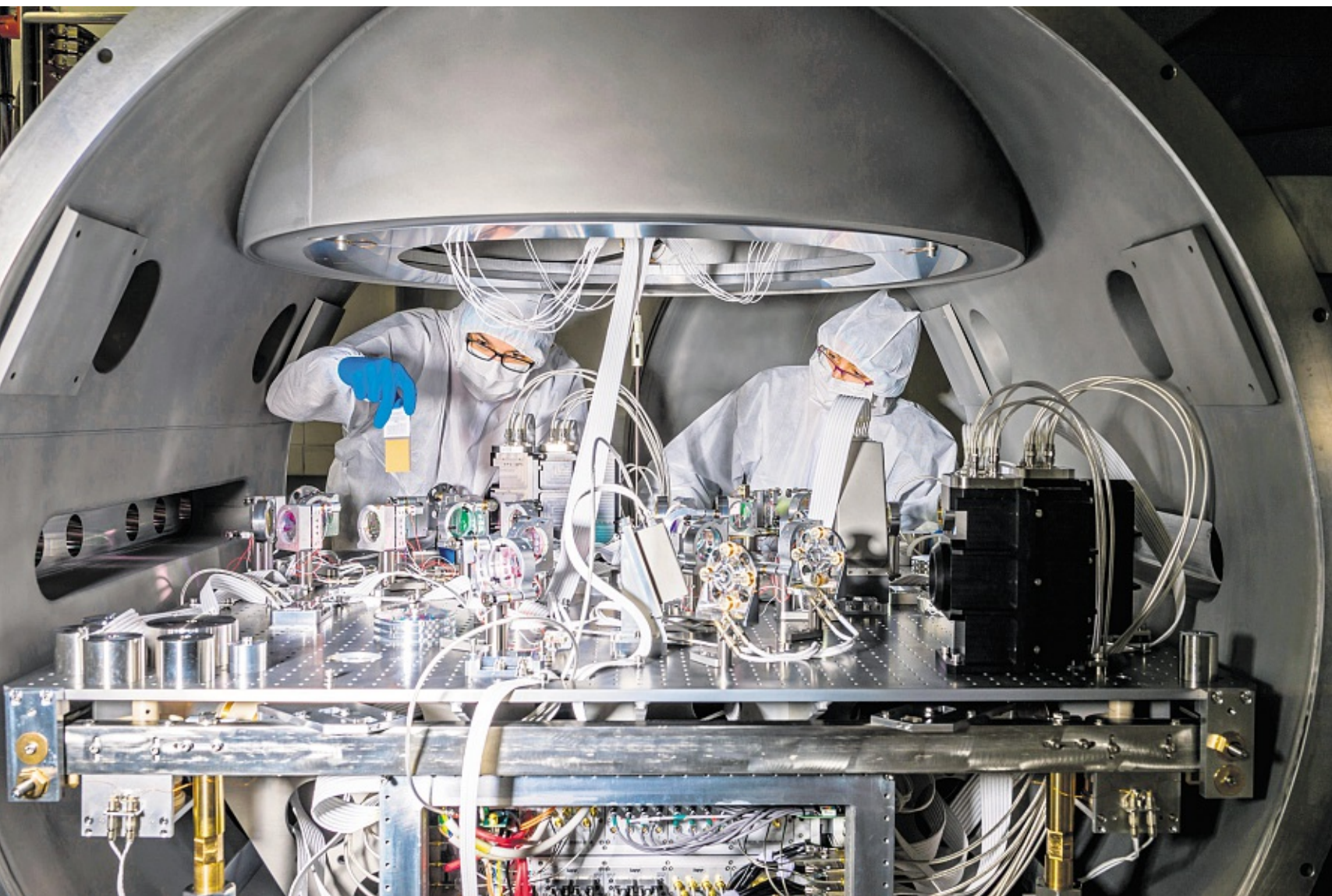
Pourquoi envoyer un détecteur complexe dans l'espace alors qu'il en existe déjà sur notre planète ? Parce que LISA, avec la taille gigantesque de ses « bras », captera des ondes gravitationnelles à des fréquences bien plus basses que ses homologues terrestres LIGO et Virgo dont les bras ne dépassent pas les 4 kilomètres. « Cette gamme de fréquences leur est inaccessible en raison des nombreuses forces perturbatrices au sol, qu'il s'agisse de bruits artificiels tels que la circulation, de bruits naturels tels que les vagues de l'océan frappant la côte, de grands phénomènes météorologiques ou de déplacements de grandes coulées de magma dans le sous-sol », précise Oliver Jennrich.

Avec LISA, les scientifiques auront accès à des phénomènes cosmiques différents, comme la fusion des trous noirs géants qui trônent au centre de nombreuses galaxies. La mission devrait aussi détecter des millions de systèmes binaires compacts, c'est-à-dire des couples d'étoiles mortes, l'une s'étant transformée en étoile à neutrons et l'autre en naine blanche. Autre espoir des astrophysiciens, attraper des ondes gravitationnelles provenant de l'Univers précoce, à l'instar du rayonnement fossile émis 380 000 ans après le Big Bang, que l'on voit dans le domaine des ondes électromagnétiques.

Un des défis de LISA consistera à faire le tri dans tout ce ramdam. Les chercheurs estiment que, tout comme on parvient à distinguer la conversation à sa table dans un restaurant bondé, les signaux les plus saillants émergeront du bruit de fond. La fusion de trous noirs massifs devrait, quant à elle, créer des signaux de forme caractéristique que l'on pourra guetter dans le flux de données.

Si LISA décolle bien en 2035, elle n'observera pas le cosmos avant 2037, le temps pour ses trois vaisseaux de se positionner à 50 millions de kilomètres de la Terre, qu'ils suivront dans sa course autour du Soleil. Prévue pour durer au moins quatre ans, mais plus probablement dix, cette ambitieuse mission coûtera 2,5 milliards d'euros, dont environ 1,8 milliard pris en charge par l'ESA. ■

PIERRE BARTHÉLÉMY



De haut en bas et de gauche à droite : Instrumentation utilisée pour mesurer le décalage des rayons laser dans le Virgo, que peuvent provoquer les ondes gravitationnelles ; Intérieur du bras ouest de 3 kilomètres de Virgo ; Essuyage d'une optique compensatrice du détecteur LIGO ; en janvier 2016. CYRIL FRESILLON/LMA/CNRS IMAGES

CES ONDES SONT
DES MESSAGÈRES CRUCIALES
POUR COMPRENDRE
L'HISTOIRE DES GALAXIES (...).
ELLES INFORMENT SUR LES
DÉBUTS DE L'UNIVERS TOUT
AUTANT QUE SUR SON AVENIR

Mais pour de grosses supernovae, des phénomènes physiques les rendent instables, au point que l'explosion ne laisse rien. Pas même un trou noir. Or, les astronomes en trouvent. Ils se demandent s'ils ne seraient pas issus de générations successives de fusion-crétion à partir de trous noirs plus petits. Mais davantage de cas, et sans doute aussi des mesures de leur rotation, seront nécessaires pour percer le mystère.

La statistique vient également au secours des cosmologistes pour tenter de mesurer la fameuse vitesse d'expansion de l'Univers. On l'a vu, la mesure directe est « facile », mais pour l'instant, seule une « sirène brillante » a été trouvée. Alors des méthodes utilisant directement les « sirènes sombres » que sont les trous noirs ont été développées. Comme toute onde, la fréquence de l'onde gravitationnelle est modifiée par l'expansion de l'Univers. Il existe donc un lien entre la masse des trous noirs et ce décalage de fréquence. Si bien qu'avec beaucoup de trous noirs, les physiciens peuvent se faire une idée de la vitesse d'expansion. Pour l'instant, la précision de la mesure reste en deçà d'autres méthodes.

Un domaine en pleine expansion

Depuis neuf ans, les astrophysiciens rêvent éveillés. Régulièrement, des surprises secouent leurs détecteurs et ils en espèrent d'autres. Depuis la dernière explosion d'une supernova proche de notre galaxie, en 1987, tout le monde attend la prochaine car, cette fois, il serait possible de capter les ondes gravitationnelles liées à ce cataclysme vital pour l'évolution des galaxies. Un nouveau feu d'artifice pourrait être riche en enseignements.

Autre curiosité, « voir » une étoile à neutrons « bossue », c'est-à-dire présentant une anomalie géométrique suffisante pour que sa rotation engendre des émissions d'ondes gravitationnelles de façon continue. Les théoriciens prévoient que moins d'un millimètre de déformation pourrait engendrer ces nouvelles vagues, et aider à mieux cerner les lois de cette matière compressée.

Dans la liste de souhaits, il faut ajouter la possibilité de sentir la vibration du rythme des fusions de trous noirs primordiaux, reliques du Big Bang. L'effet d'un seul trou noir serait faible, mais le bruit de l'ensemble pourrait être perçu.

Ainsi, outre les recherches des désormais classiques paires de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, les physiciens possèdent des programmes d'analyse sans a priori sur la nature des sources, traquant des signaux anormaux qui réveilleraient au moins deux détecteurs sur Terre. « C'est génial. C'est un domaine en pleine expansion. Il y a des nouveautés, des surprises, et on sait que l'avenir en apportera d'autres », s'enthousiasme Nicola Tamanini, du CNRS. Les ondes gravitationnelles n'excitent pas que la gelée cosmique. ■

DAVID LAROUSSIERE

LE CONTEXTE

La première détection par Virgo

Le 14 août 2017, le détecteur européen identifie sa première onde gravitationnelle, la quatrième observation de l'histoire.

La plus proche

Le 17 août 2017, à seulement 130 millions d'années-lumière, deux étoiles à neutrons ont fusionné. C'est le seul événement qui a donné lieu à des émissions de lumière, rayons gamma, X...

La plus grosse

Le 26 avril 2019, une fusion géante a lieu entre un trou noir de 105,5 masses solaires (le premier dépassant le « quintal solaire » à être repéré) et un autre de 76 masses solaires.

La plus déséquilibrée

Le 14 août 2019, un couple inégal a été identifié, l'un, de 23,3 masses solaires, étant presque dix fois plus lourd que l'autre. Il s'agit probablement d'une étoile à neutrons.

L'EXPOSITION

Sur les traces des géants disparus

D'un paresseux de 4 tonnes, à un serpent de 15 mètres, « Géants », à Toulouse, reconstitue une mégafaune aux corps imposants

TOULOUSE - envoyé spécial

Lorsque, au Muséum d'histoire naturelle de Toulouse, le visiteur descend dans la salle où vient de s'ouvrir l'exposition « Géants », l'escalier qu'il emprunte est surplombé par les mâchoires ouvertes d'un mégalodon, squalo disparu à côté duquel le grand requin blanc ferait presque figure de gentil poisson. La couleur est annoncée: bienvenue dans la démesure, parmi ces espèces qui, après l'extinction des dinosaures non aviens il y a 66 millions d'années, ont pris leurs quartiers, leurs aises et surtout du volume dans des niches écologiques devenues vacantes. Cette mégafaune a disparu à son tour, mais la paléontologie, par l'extraction et l'étude des fossiles, permet de lui redonner corps.

Le parti pris de cette exposition, conçue à l'origine par l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique, consiste à montrer ces animaux grandeur nature. Certains sont présentés sous la forme classique du squelette reconstitué, comme par exemple le félin à dents de sabre, le *Megatherium* américain – un paresseux de 4 tonnes aux faux airs d'ours – ou le *Gastornis laurenti*, oiseau de 1,70 mètre de haut à gros bec.

Mais les invités les plus costauds prennent une forme plus audacieuse, plus esthétique aussi, puisqu'ils se résument à des silhouettes, sortes d'origamis colossaux à facettes blanches découpées dans... des panneaux d'isolation. La scénographie joue à merveille de ces corps imposants, soit en s'en servant comme cartels ou comme écrans, soit en supprimant certains panneaux pour y voir, par transparence, les gros os du bétail.

Inconvénients de la grande taille

On circule donc entre le *Titanoboa* – serpent terrifiant de 15 mètres –, le baluchithère – le plus massif des mammifères terrestres, avec ses 17 tonnes – et l'incontournable mammoth. Signalons aussi *Gigantopithecus blacki*, le plus grand singe connu, éteint il y a environ 300 000 ans, avec ses 3,70 mètres de haut et ses 200 à 400 kilos.

Les causes du gigantisme sont diverses (meilleure protection contre le froid, défense contre les prédateurs...). Cependant, l'exposition met d'abord l'accent sur les inconvénients de la grande taille. « *La règle de Cope-Depéret dit que "plus une espèce grandit, plus elle s'approche de son extinction, car plus elle sera sensible aux changements environnementaux"* », explique Francis Duranthon, directeur du Muséum de Toulouse.

Ce paléontologue passionné ajoute que « *nous, les hommes, avons pris 20 centimètres depuis la guerre de 1914* ». Et que, même si nous nous sentons bien petits en parcourant l'exposition, nous n'en sommes pas moins une espèce de grande taille: « *Chez les vertébrés, au-delà de 45 kilos, on fait partie des géants...* » ■

PIERRE BARTHÉLÉMY

« *Géants* », au Muséum d'histoire naturelle de Toulouse. Jusqu'au 29 juin 2025.

LIVRAISON

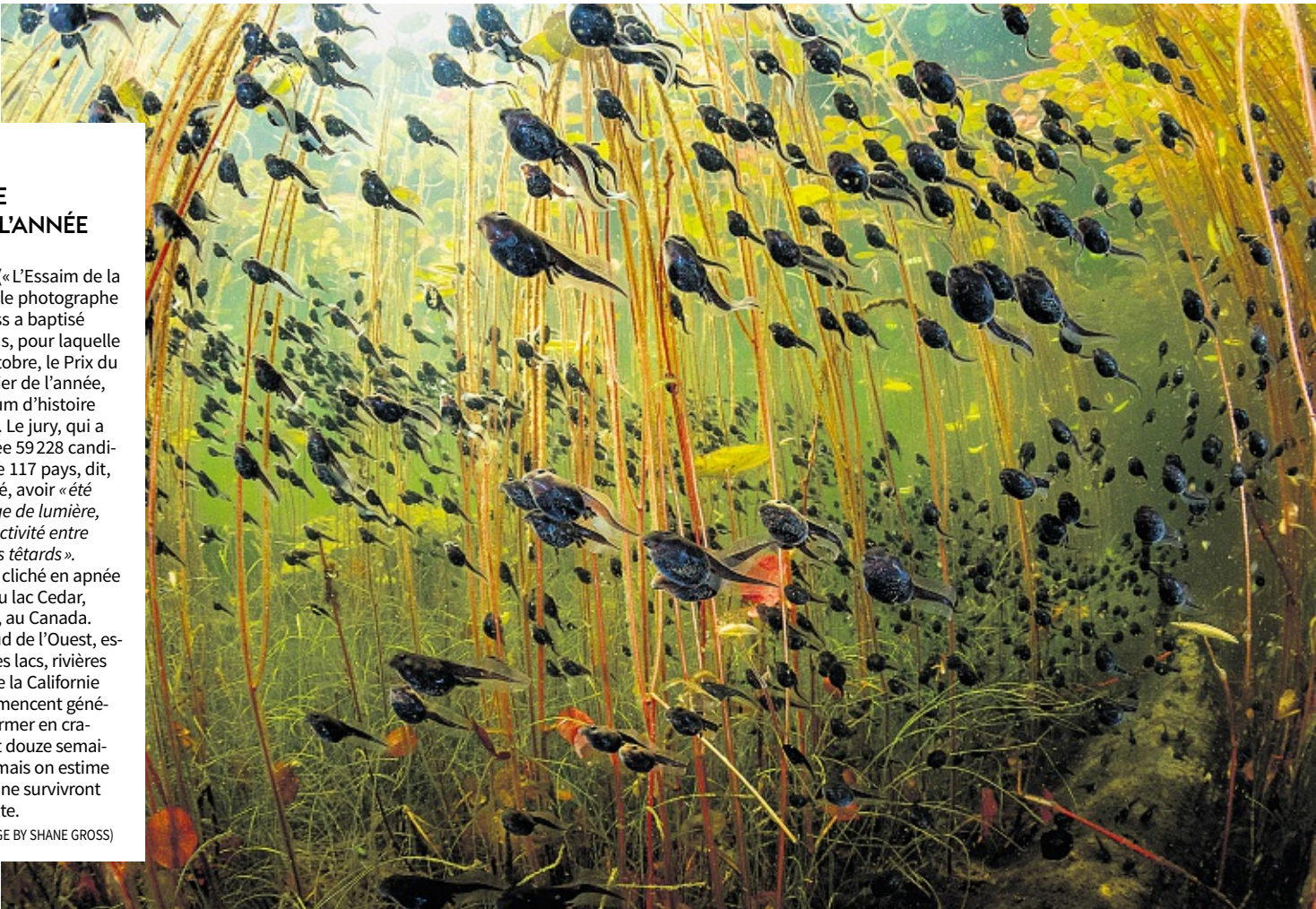
GÉOGRAPHIE « Atlas des glaciers »

Dans son *Atlas des glaciers*, le géographe Denis Mercier, spécialiste des régions froides, propose un panorama complet de la fraction gelée de la Terre. Antarctique, Arctique, glaciers de montagne sont passés en revue, en soulignant le lien entre cryosphère et climat. Toute une partie est consacrée à la fonte des glaces sous l'effet du réchauffement planétaire. Denis Mercier énumère les conséquences de ce phénomène avec pédagogie, sans verser dans d'improbables scénarios catastrophe. > De Denis Mercier, cartographie de Gaëlle Sutton (Autrement, 96 p., 24 €).

SHANE GROSS, PHOTOGRAPHE ANIMALIER DE L'ANNÉE

« *The Swarm of Life* » (« L'Essaim de la vie »). C'est ainsi que le photographe canadien Shane Gross a baptisé cette photo de têtards, pour laquelle il a remporté, le 8 octobre, le Prix du photographe animalier de l'année, décerné par le Muséum d'histoire naturelle de Londres. Le jury, qui a départagé cette année 59 228 candidatures provenant de 117 pays, dit, dans un communiqué, avoir « été captivé par le mélange de lumière, d'énergie et de connectivité entre l'environnement et les têtards ». Shane Gross a pris ce cliché en apnée sous les nénuphars du lac Cedar, sur l'île de Vancouver, au Canada. Ces têtards de crapaud de l'Ouest, espèce présente dans les lacs, rivières et milieux humides de la Californie jusqu'à l'Alaska, commencent généralement à se transformer en crapauds entre quatre et douze semaines après l'éclosion, mais on estime que 99 % d'entre eux ne survivront pas jusqu'à l'âge adulte.

(PHOTO : SHANE GROSS/IMAGE BY SHANE GROSS)



LA VIE CACHÉE DES PLANTES

L'ARME DES PINS CONTRE LES CHARANÇONS

Par FLORENCE ROSIER

Les plantes parlent-elles? Oui... mais à leur façon, répond la science, déjouant tout soupçon d'anthropomorphisme. On sait, depuis les années 1980, que toutes les espèces végétales produisent et émettent dans l'atmosphère des nuages de molécules, les composés organiques volatils (COV). Elles utilisent ces COV comme messagers chimiques, qui peuvent être captés et déchiffrés par d'autres plantes ou par des animaux. Plus de cinq mille d'entre eux sont connus à ce jour, tous formés d'atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, auxquels peuvent s'ajouter d'autres éléments comme le soufre. Leur odeur est souvent perceptible par notre nez humain, comme pour certains terpénoïdes (citral, menthol, camphre...), des composés aromatiques souvent introduits dans nos parfums.

Incapables de se mouvoir, fixées au sol par leurs racines, les plantes ont dû innover. C'est ainsi qu'elles ont évolué de façon à communiquer avec leurs congénères, leurs partenaires ou leurs ennemis. Grâce aux signaux aériens lancés par leurs feuilles, leurs fleurs ou parfois leurs racines, elles augmentent leurs chances de reproduction ou de défense contre leurs agresseurs. C'est un « monde invisible d'une grande complexité », résume Hélène Gautier, chercheuse à l'Inrae d'Avignon. « Si toutes les plantes produisent des cocktails de COV, ces mélanges diffèrent d'une espèce à l'autre », ajoute Louis-Valentin Méteignier, chercheur à l'Inrae de Montpellier. Le fruit d'une coévolution, en somme, entre chaque plante et les ravageurs ou les pollinisateurs qui lui sont propres.



Un pin sylvestre. MARTIN ZWICK/BIOSPOTO

« Il soufflait un air délicieux, humide, qu'embau- maient les exhalaisons des arbres... » Les arbres dont il est question, dans l'étude publiée le 13 septembre dans la revue *Science*, émettent des effluves aussi parfumés que ceux chers à Thomas Mann, dans *La Montagne magique*. Ce sont des pins sylvestres.

Ces conifères forment de hauts fûts, mais ce sont leurs semis qu'une équipe finlandaise a étudiés. Les chercheurs ont déchiffré les alertes lancées par les racines de ces résineux dès qu'elles sont attaquées par un de ses pires ravageurs, le grand charançon du pin (*Hylobius abietis*). Au printemps, les adultes de ce co- léoptère pondent dans les grosses racines des pins,

puis les larves pénètrent sous l'écorce. Une fois adulte, l'insecte peut anéantir une plantation en quelques jours en se gavant de l'écorce des jeunes plants. Lors d'une attaque, les racines de *Pinus sylvestris* lancent des SOS, ou plutôt des COV qui diffusent à travers les pores du sol puis sont libérés dans l'atmosphère.

Résistance améliorée

Hao Yu et ses collègues de l'université de Finlande orientale ont d'abord inoculé le charançon dans les parties souterraines des jeunes pins. Cette infestation a augmenté les émissions de COV, qui étaient collectés puis analysés par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse. Ces COV ont amélioré la résistance aux charançons des plantes voisines non endommagées. « Ces COV réduisaient la voracité de l'insecte », explique M. Méteignier.

La nouveauté réside dans le décryptage d'autres messagers chimiques qui, après avoir été émis, sont « réécrits » dans l'atmosphère. En effet, les COV y sont oxydés en d'autres molécules, les aérosols organiques secondaires (AOS), qui persistent plus longtemps et se dispersent plus loin. Mais quel est leur impact? Pour le savoir, les auteurs ont exposé des semis de pin à des particules d'AOS formées par oxydation des COV dans un réacteur qui mime les conditions de leur apparition dans l'atmosphère. Résultat, une photosynthèse améliorée, des émissions de COV renforcées et des dommages moindres causés par les charançons. « C'est un travail très solide », estime M. Méteignier, qui suggère que les AOS « auraient une fonction d'immunité collective des pins à longue distance ». Reste à le démontrer dans la nature. ■

L'ÉNIGME MATHS – N° 30

Chaque semaine, le mathématicien Mickaël Launay vous soumet un problème. A vous de jouer !

LES NOYAUX

En 1702, dans ses *Mémoires de l'Amérique septentrionale*, l'anthropologue Louis Armand de Lom d'Arce (1666-1716), aussi connu sous le nom de baron de La Hontan, rapporta les règles d'un jeu de hasard qu'il avait pu observer auprès de certaines tribus amérindiennes de l'est du Canada, dont probablement les Wendats et les Algonquins. Il le décrit ainsi : « [Le jeu] des noyaux est un jeu de hasard, ils sont noirs d'un côté et blancs de l'autre, on n'y joue qu'avec huit seulement. On les met dans un plat, qu'on pose à terre, après avoir fait sauter ces noyaux en l'air. Le côté noir est le bon ; le nombre impair gagne. » Pour le dire autrement, le joueur lance huit noyaux bicolores qui, à la manière d'un jeu de pile ou face, retombent soit sur leur côté noir, soit sur leur côté blanc. On compte alors les noyaux noirs

et si leur nombre est impair, le joueur qui a lancé gagne la manche. Les noyaux ont été sélectionnés pour être équilibrés, c'est-à-dire qu'ils ont autant de chance de tomber d'un côté ou de l'autre. Sauriez-vous dire si, à ce jeu, le lanceur de noyaux a plus de chances de perdre ou de gagner ? Un joueur malhonnête décide de donner un coup de pouce au hasard en remplaçant discrètement quatre des noyaux équilibrés par des noyaux pipés qui tombent du côté noir trois fois sur quatre et du côté blanc une fois sur quatre. ► A-t-il ainsi augmenté ou diminué ses chances de gagner ? ► Qu'en est-il s'il remplace les huit noyaux par des noyaux pipés ?

INDICE

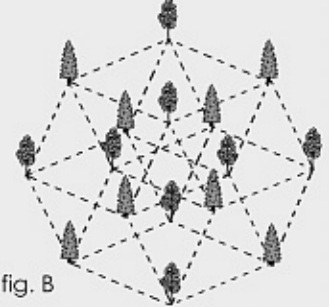
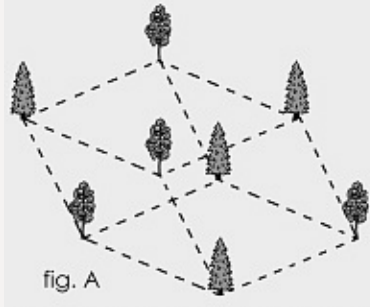
.niag ed sétilibaborp xua neir egnahc en icec : spmet emèm ne suot noir te nu rap nu sécnal tneios xuayon sel euq zenigamI

SOLUTION DE L'ÉNIGME N° 29

Si on plante deux forêts de Bachmakov de catégorie 2 identiques à un kilomètre l'une de l'autre, alors en inversant les bouleaux et les sapins d'une des deux, on obtient une forêt de Bachmakov de catégorie 3. Les arbres occupent alors les sommets d'un cube vu en perspective, comme représenté sur la figure A. En reproduisant ce procédé

avec deux forêts de catégorie 3, on en obtient une de catégorie 4, comme représenté sur la figure B. Cette figure peut être interprétée comme la représentation en perspective d'un hypercube de dimension 4. En répétant cette construction en dédoublant à chaque fois la forêt obtenue et en la décalant d'un kilomètre dans une nouvelle

direction, on peut obtenir des forêts de toute catégorie. Le nombre d'arbres est doublé à chaque étape, ainsi, une forêt de catégorie 10 comptera 2¹⁰ = 1024 arbres au minimum. Il est alors possible de former une plus vaste forêt en reproduisant la disposition obtenue plusieurs fois à distance suffisante les unes des autres.





CARTE BLANCHE

Taxonomie des pâtes farcies italiennes

Par ALICE LEBRETON

Qu'est-ce qui rapproche les pâtes italiennes et les lépidoptères ? Les farfalles, me direz-vous, *farfalle* désignant, en italien, aussi bien les papillons que les pâtes sèches qui leur ressemblent. C'est pourtant une autre grande famille de recettes de la cuisine italienne qui a récemment réuni des spécialistes de l'évolution des lépidoptères, des sciences des aliments et de l'histoire de la gastronomie : les pâtes farcies. L'article issu de leurs travaux, paru le 12 juillet dans la revue *Discover Food*, propose une nouvelle classification des variétés italiennes de ces pâtes, situe leur implantation probable en Italie du Nord et retrace les liens de parenté et divergences locales ayant conduit à la diversité des recettes actuelles.

L'originalité de cette étude repose sur sa démarche méthodologique, héritée de la biologie évolutive, consistant à appliquer des approches phylogénétique et biogéographique aux évolutions culturelles. Les chercheurs postulent que l'évolution des recettes traditionnelles a procédé, comme chez les espèces vivantes, par petites modifications successives (analogues aux mutations génétiques), puis sélection, disparition des formes intermédiaires et enfin fixation des spécialités culinaires typiques d'une localité, ce qui s'apparente à une spéciation.

Deux grandes familles

Leur classification des pâtes farcies se distingue de tentatives précédentes, fondées sur des critères purement morphologiques : certaines similitudes d'apparence brouillaient les liens de parenté entre recettes, de la même manière que les anciennes classifications naturalistes étaient biaisées par les convergences évolutives. Pour autant, faute de « gènes de recettes », la taxonomie des pâtes ne peut pas être guidée par les principes de la phylogénie moléculaire, reposant sur des divergences entre séquences d'ADN. D'autres critères de classification ont donc été sélectionnés : la méthode de pliage de la pâte et la forme obtenue, les principaux ingrédients, le type de cuisson, l'accompagnement par une sauce ou un bouillon, l'emploi d'huile d'olive ou de beurre, ainsi que le caractère de spécialité régionale, ce qui correspondrait pour une espèce à l'aire de répartition.

La nouvelle taxonomie met en évidence deux grandes familles de pâtes farcies italiennes : les unes apparentées aux raviolis, reconnaissables à leur forme aplatie, les autres affiliées aux tortellinis, qui se distinguent par un repliement en trois dimensions. L'ensemble forme un embranchement dans l'arbre plus vaste des recettes de pâtes farcies d'Europe et d'Asie, qui comprend aussi bien les gyoza japonais que les *pelmenis* russes et les *wontons* chinois. A l'exception des *culurgiones* de Sardaigne, les pâtes farcies italiennes seraient issues d'une première implantation en Italie du Nord, jouant le rôle d'événement fondateur, avant leur diversification.

Au cours de l'évolution, l'« adaptation à leur milieu » de certaines recettes peut être inférée : le blé dur n'est par exemple pas cultivé dans la plaine du Pô, ce qui a favorisé la prédominance de pâtes fraîches, préparées à base de farine de froment et d'œufs.

La diversité des recettes issues de cette évolution se traduit par de nombreuses variations, parfois audacieuses, sur un même thème. Quelques spécialités se démarquent nettement par un trait dérivé caractéristique : les *tortelli alla lastra*, de grandes raviolis rectangulaires découpées à la roulette, farcies d'une préparation à base de pomme de terre, de pecorino et d'herbes aromatiques, différent par leur cuisson traditionnelle sur une plaque de pierre ou d'argile, à la manière de la *piadina* de Romagne ; et le *turtel sguasarot* de Mantoue enferme une farce à base de haricots et se frit à l'huile d'arachide. Un arbre phylogénétique d'une grande richesse gustative, à explorer du bout des papilles. ■

Alice Lebreton

Directrice de recherche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), Institut de biologie de l'Ecole normale supérieure

La chronicisation des cancers métastatiques, un défi pour les malades et la société

TRIBUNE - Un collectif composé d'associations, de professionnels et d'acteurs de la santé exhorte les décideurs publics à une meilleure prise en charge des patients atteints de ces cancers

COMBIEN DE PATIENTS SE TROUVENT DANS UNE SITUATION DE VULNÉRABILITÉ FINANCIÈRE FACE À LA MALADIE ?

Nous, collectif de onze associations, composé du Collectif 1310 rassemblant les associations engagées dans le cancer du sein métastatique, mais aussi de Cerhom et l'Anamacap engagés dans les cancers masculins, et Mon réseau cancer du poumon. Avec des professionnels et acteurs de la santé, nous interpellons les décideurs publics sur la chronicisation de ces cancers étendus à plusieurs organes. Nous appelons à une prise en compte des défis que cette évolution implique pour les malades et la société.

Certains cancers métastatiques deviennent chroniques dès lors que la maladie est jugée non guérissable au regard des connaissances médicales actuelles, mais que sa progression peut être maîtrisée. En quelques années, les innovations thérapeutiques ont transformé positivement le pronostic de ces maladies. Elles permettent d'envisager de vivre plus longtemps, tout en améliorant la qualité de vie personnelle et professionnelle des personnes concernées.

Pour autant, ces progrès observés ne sauraient faire illusion : la maladie reste instable, invisible et incertaine, avec la menace de la rechute et des effets cumulatifs de la prise en charge.

Cette situation paradoxale est particulièrement inédite. Elle soulève trois nouveaux défis majeurs : disposer de données de santé pour identifier les nouveaux besoins et améliorer la prise en charge ; faire évoluer l'organisation et la coordination des soins ;

faire évoluer le regard de la société, qui invisibilise les patients dans leur vie sociale et professionnelle.

Aujourd'hui, il n'existe pas d'évaluation précise du nombre de ces cancers et de leur évolution, ni de registres spécialisés. Les données de santé disponibles restent parcellaires, générales et trop anciennes.

Disposer de ces données permettrait de faire avancer la recherche et de mener des politiques publiques plus adaptées et ciblées dans les territoires, tout en luttant contre les inégalités d'accès et de prise en charge.

Nous appelons à créer des indicateurs propres aux cancers métastatiques afin de mieux les recenser. Il nous faut, pour cela, la mobilisation de l'ensemble des acteurs de la filière, associations, médecins, mais aussi des autorités de santé, de la direction générale de l'offre des soins, de l'Assurance maladie, de l'Institut national du cancer (Inca), pour travailler à la définition de ces indicateurs et à leur collecte.

Par ailleurs, notre système de santé est conçu pour la prise en charge des cancers localisés à l'hôpital. Il n'est pas encore suffisamment adapté aux parcours de soins des cancers métastatiques et ne dispose pas des moyens d'une coordination avec la ville. Et paradoxalement, plus la maladie s'installe, moins les patients sont accompagnés dans la durée.

Certes, les patients chroniques bénéficient du régime affection de longue durée dite « exonérante ». Pourtant, malgré la gravité de la maladie, et

comme le précise l'Assurance maladie sur son site, « certains » frais restent à la charge du malade. Ainsi, les patients atteints d'un cancer qui se chronicise ne peuvent pas aujourd'hui bénéficier d'un financement par l'Assurance maladie du panier de soins de support indispensables : psychologue, sexologue, activité physique adaptée, nutrition...

Ainsi, nous demandons qu'une mission d'information spécialisée soit lancée au sein des groupes d'études Cancer du Sénat et de l'Assemblée nationale pour travailler sur des modalités de financement des soins de support pour les cancers métastatiques et l'adaptation des prises en charge.

Enfin, selon l'Inca, 20% des personnes en emploi au moment de leur diagnostic (tous cancers confondus) ne travaillent plus cinq ans après. Et quand les patients gardent leur travail, combien se sentent incompris par leurs collègues ou leurs managers face à leurs absences médicales ou leurs séquelles invisibles ? L'enjeu du retour au travail des malades est cru-

cial : favorisons leur insertion professionnelle en sensibilisant les entreprises et les administrations à ces cancers.

A l'incertitude professionnelle, s'ajoute souvent une précarisation financière. Combien de patients, ne bénéficiant pas d'une prévoyance, se trouvent dans une situation de vulnérabilité financière face à la maladie ? De même, combien de patients ne peuvent plus emprunter ou souscrire une assurance ?

Nous demandons à tous les acteurs, de l'Assurance maladie jusqu'aux organisations patronales, en passant par la médecine du travail et les syndicats, de se mobiliser pour faire évoluer le cadre administratif et financier, afin de ne pas ajouter l'injustice économique et sociale à celle de la maladie.

Nous souhaitons contribuer à la réflexion des décideurs publics et à l'action sur ces trois chantiers prioritaires. C'est dans cette optique d'échanges et de partage de bonnes pratiques que seront organisées, mardi 10 décembre, les Rencontres cancer & citoyenneté, en partenariat avec le Collectif 1310 et Cerhom et avec le soutien institutionnel de Pfizer, pour que les personnes qui vivent avec un cancer métastatique puissent rester pleinement actrices de leur vie citoyenne. ■

¶ **Didier Bazzocchi**, think tank Craps ; **Fabrice Bossaert**, Cerhom ; **Mario Di Palma**, Afso ; **Laure Guéroult Accolas**, Collectif 1310 ; **Roland Muntz**, Anamacap

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



ZOOLOGIE

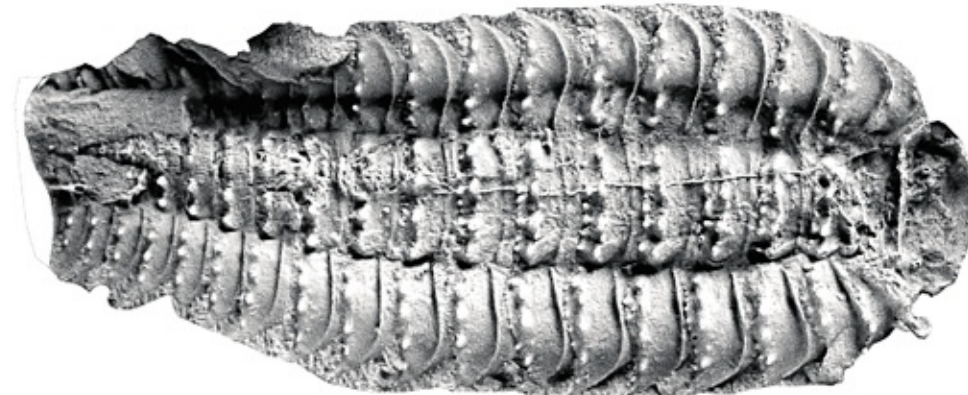
Un mille-pattes géant bouscule l'arbre des espèces

C'était un temps déraisonnable. Il y a plus de trois cents millions d'années, les libellules avaient la taille de nos aigles, les scorpions celle de nos chiens. Les paléontologues nomment ce phénomène le « gigantisme paléozoïque » et en discutent les causes. Les uns y voient l'effet d'un surplus d'oxygène dans l'atmosphère au cours du carbonifère (entre 358 millions et 298 millions d'années). Les autres observent que les arthropodes, premiers animaux sortis des eaux, n'ont longtemps souffert d'aucune concurrence dans l'accès à la ressource végétale.

L'*Arthropleura* en est un exemple emblématique. Depuis 1854 et la découverte en Grande-Bretagne de ses premiers segments fossiles, le mille-pattes géant fascine. Comment vivait-il ? Que mangeait-il ? Et déjà, qui était exactement cette créature segmentée et allongée de près de 3 mètres ? C'est que le terme de « mille-pattes » n'a rien de scientifique.

Les myriapodes – sa juste appellation – ont des sous-embranchements qui cachent plus de cinq mille espèces regroupées en quatre classes. Pour nommer les deux principales, les Anglo-Saxons ont choisi *centipedes* et *millipedes*. Simples et clairs – même si les seconds n'ont pas forcément dix fois plus de segments que les premiers.

Le français, faute de nom commun, s'en remet aux noms scientifiques, à savoir chilopodes et diplopodes. La différence entre les deux ? Pour ce qui est du corps, essentiellement le fait que les seconds affichent deux paires de pattes par segments, là où les premiers



Le fossile d'«*Arthropleura*», nom scientifique du mille-pattes géant découvert en Saône-et-Loire.

LHÉRITIER ET AL.,
SCL. ADV. 10, EADP6362

n'en ont qu'une... Pour cette raison, au vu des fossiles exhumés, *Arthropleura* avait été classé parmi les diplopodes.

Un article publié, mercredi 9 octobre, dans la revue *Science Advances* par une équipe internationale coordonnée par le laboratoire de géologie de Lyon, vient bouleverser le paysage. Non seulement, le géant rampant n'est pas un simple diplopode, mais c'est tout l'arbre phylogénétique des mille-pattes qu'il va falloir revoir.

Tomographie à rayons X

Les paléontologues français ont réussi à faire parler deux nodules retrouvés dans des exploitations de charbon de Montceau-les-Mines (Saône-et-Loire), au début des années 1980. A l'époque, les paléontologues amateurs, relayés par des universitaires, avaient bien compris que les fossiles de 4 centimètres de long, qu'ils avaient cassés en deux, cachaient un *Arthropleura* juvénile. Mais il n'était pas question de poursuivre le saucissonnage, au risque de tout détruire.

Encore moins de pénétrer la roche pour en lire l'intérieur – aucune technique ne le permettait.

Mickaël Lhéritier, thésard en paléontologie à l'université de Lyon, les a exhumés pour leur réserver un traitement désormais éprouvé dans la science des matériaux anciens : la tomographie à rayons X. Comme dans un scanner, l'échantillon subit des coupes successives, mais, en plus, il tourne. Ainsi apparaît une image complète en trois dimensions de l'intérieur du nodule. « On a vu apparaître un squelette complet, avec les vingt-quatre segments, jusqu'à la tête, raconte-t-il. Jusqu'ici, on n'avait jamais trouvé plus de dix segments. Et la tête demeurait un mystère complet. »

Or cette tête présente des caractéristiques de chilopode plus que de diplopode. « Un mix de caractères corporels de diplopode et de caractères céphaliques de chilopode », résume M. Lhéritier. J'ai été tellement surpris que j'ai demandé à des collègues anglais de tout vérifier. Ils ont confirmé. »

Cette découverte bouleverse la parenté entre les groupes de mille-pattes. Contrairement à ce qu'on a longtemps cru, diplopodes et chilopodes apparaissent comme des cousins proches, avec même un nœud commun sur l'arbre phylogénétique. « Cette proximité avait été affirmée sur la foi de données moléculaires, mais on n'avait pas de fossiles pour le soutenir », explique le jeune chercheur. *Maintenant, c'est fait.* »

L'analyse a permis de voir l'intérieur de l'estomac du juvénile. Sauf qu'il était vide. Ce n'est donc pas encore cette fois que l'on saura de quoi se nourrissait exactement l'animal. Enfin, la tête a révélé une dernière surprise : des yeux « pédonculés », à savoir fixés à la tête par une tige, à la manière, non des mille-pattes mais des crabes ou des crevettes. Faut-il y voir les restes d'un passé aquatique ? Ou *Arthropleura* était-il moins terrestre qu'on le pensait ? Comme souvent en sciences, une grande découverte pose plus de questions qu'elle n'apporte de réponses. ■

NATHANIEL HERZBERG

DAKAR - correspondance

Dans une pièce sombre de l'université Cheikh-Anta-Diop de Dakar, de grandes étagères montent jusqu'au plafond, sur lesquelles s'empilent des tiroirs poussiéreux mangés par les termites. Ils sont remplis de cailloux, de silex et de poteries provenant du Mali, de Mauritanie, du Niger et du Sénégal. Devant trônent un amas de caisses trouées et des malles en fer rouillées. « Dans cette réserve se trouvent les plus anciennes collections de l'Institut fondamental d'Afrique noire [IFAN], recueillies avant même l'indépendance du pays en 1960 », indique le professeur Ibrahima Thiaw, l'un des premiers archéologues sénégalais à s'être intéressé à la traite transatlantique des Noirs, entre le XV^e et le XIX^e siècle. L'IFAN a été créé en 1936, quand Dakar était la capitale de l'Afrique-Occidentale française.

A l'étage, dans une salle climatisée, des objets venant de l'île de Gorée, située au large de Dakar et symbole du commerce triangulaire des esclaves, sont stockés dans des armoires de rangement plus modernes. Face à elles, des piles de cartons s'affaissent. « Des collègues européens ont déterré des objets pour les étudier. Cela leur a permis de publier de prestigieux articles scientifiques. Et après, ils nous ont laissés des malles d'objets difficiles à conserver », déplore Ibrahima Thiaw, qui dirige l'unité de recherche en ingénierie culturelle et en anthropologie (Urica), créée en 2017, et qui s'inscrit dans une approche décoloniale. Cette démarche – également présente dans d'autres disciplines comme la sociologie ou l'anthropologie – se distingue par une volonté de rompre avec les pratiques et les grilles d'analyse héritées de la colonisation.

« Dimension réparatrice »

« Certaines équipes continuent d'agir comme si nous étions toujours à l'époque coloniale », regrette-t-il. L'archéologue voudrait que les scientifiques occidentaux intègrent davantage la préservation du patrimoine et la formation des étudiants à sa conservation dans leurs budgets de recherches sur le continent africain.

Dans les salles de l'Urica, une petite dizaine d'étudiants travaillent sur leur ordinateur. Sur les murs, les visages d'Aline Sitoé Diatta (1920-1944), héroïne de la résistance sénégalaise contre la colonisation française, et de Frederick Douglass (1818-1895), abolitionniste américain, ont été peints par le collectif de graffeurs panafricains RBS Crew.

Lamine Badji, doctorant en archéologie, se penche sur des crânes de griots, ces conteurs qui transmettent oralement l'histoire de leur pays. Ces restes humains ont été récupérés dans des baobabs par un anthropologue belge en 1965. Jusqu'à l'interdiction de cette pratique par le président Léopold Sédar Senghor en 1962, les griots n'étaient pas enterrés dans les cimetières avec les autres habitants, mais à l'intérieur du tronc d'un de ces arbres sacrés de l'Afrique de l'Ouest. « L'objectif est de "décoloniser" cette collection en reprenant son étude dans un prisme sénégalais, c'est-à-dire en veillant à respecter nos croyances et nos traditions. Il nous faut au préalable obtenir le consentement des familles car se pose la question éthique de leur exploitation scientifique », explique le doctorant.

« D'autres restes humains collectés au Sénégal ont été laissés sans suivi de conservation, ils sont



maintenant pourris et contaminés par des bactéries. Où est le respect ? Cela ne se serait jamais produit en Europe. Les corps noirs ne sont pas inférieurs aux autres corps », s'insurge le chercheur sénégalais, qui s'attache à redonner de la dignité à ces restes humains. Il a ainsi prélevé de l'ADN sur le crâne de ces griots pour tenter d'identifier leurs descendants. « Nous avons pu retrouver la trace de certains d'entre eux en Amérique, ce qui prouve que des descendants de griots ont été envoyés comme esclaves outre-Atlantique, bien que des écrits affirment qu'ils avaient été épargnés », explique M. Badji.

Le respect des êtres humains et les relations avec les communautés sont au cœur du travail que souhaite promouvoir Ibrahima Thiaw. « Le corps n'est pas un objet, mais une âme, et son histoire est liée à des vivants, poursuit le professeur. Les blessures profondes que cette tragédie a laissées dans la société actuelle doivent être prises en compte. Nous ne pouvons ignorer cet aspect émotionnel. La dimension réparatrice de l'archéologie, qui permet de retisser le fil d'histoires familiales rompues par la séparation et l'exil, est trop négligée. »

Le scientifique sénégalais a concentré ses recherches sur l'île de Gorée, où il a étudié l'impact de la traite des esclaves sur les sociétés modernes d'Afrique de l'Ouest. Un travail qui lui a permis de réécrire l'histoire de cette île, du

point de vue des victimes, alors qu'elle était jusque-là racontée à travers la perspective occidentale.

« L'historiographie de la colonialité s'est imposée par l'écrit, qui est fétichisé. Même s'il ne correspond pas forcément à ce qui s'est passé, l'enjeu est d'explorer des pans de cette histoire qui ont été tués », explique le professeur Thiaw. L'archéologie nous permet de comparer ce qui est écrit dans les textes avec ce qui a été laissé par des traces matérielles. »

L'archéologue a, par exemple, été frappé par le peu d'objets européens antérieurs au XVIII^e siècle trouvés sur l'île de Gorée, alors que les textes documentent leur présence – et même leur hégémonie – à partir du XV^e siècle. « Nous avons principalement trouvé des objets européens de la vie quotidienne comme des encriers, des bouteilles d'alcool, ou des poids pour peser des objets précieux, qui datent du XVIII^e siècle », souligne M. Thiaw. Les questionnements ne manquent pas. Malgré des textes sur l'atrocité de la traite négrière, l'archéologue n'a, jusqu'à présent, découvert qu'une seule menotte, à côté d'armes à feu et de pierres à fusil.

« Désastre total »

Pour élargir leur terrain de recherche, le professeur Thiaw et ses étudiants explorent, depuis dix ans, les fonds marins en vue de cartographier les épaves de navires européens. Ils forment la première équipe d'archéologie maritime d'Afrique de l'Ouest dirigée par des Africains. De jeunes archéologues ont ainsi plongé au large de l'île de Gorée pendant un mois, entre mai et juin, pour obtenir des images acoustiques sur les sites de deux épaves, probablement liées à la traite des esclaves. L'une d'elles daterait du début du XIX^e siècle.

« La coque de l'épave est recouverte d'un alliage de cuivre qui était utilisé à l'époque pour protéger les navires de la traite atlantique des eaux chaudes et des micro-organismes qui attaquent le bois », détaille Madicke Gueye,

docteur en archéologie sous-marine. Il est le coordonnateur national du Slave Wrecks Project, un projet consacré aux épaves de navires d'esclaves entre le Sénégal, le Mozambique et l'Afrique du Sud. « Le travail d'inventaire entrepris depuis dix ans nous a permis d'identifier vingt-quatre sites archéologiques sous-marins au large de l'île de Gorée. Il nous faut désormais pouvoir les dater », ajoute-t-il.

Jusqu'alors, seules quelques plongées avaient été conduites, en 1988, par l'archéologue sous-

marin français Max Guérout. « Ce fut un désastre total. Les artefacts qui ont été sortis de l'eau ont été très mal conservés », déplore Ibrahima Thiaw. Les pièces archéologiques de ces expéditions sous-marines sont, en effet, toujours entreposées dans des seaux d'eau salée au musée historique de Gorée.

Les vestiges sous-marins ont passé des siècles immergés, à l'abri de la lumière, dans un milieu salé et pauvre en oxygène. Fragiles, ils doivent faire l'objet d'un traitement adapté. « Nous

avons perdu une bonne partie de cette collection, notamment tous les objets en bois », regrette Madicke Gueye. Le jeune chercheur milite pour l'ouverture d'un laboratoire de conservation qui permettrait d'extraire en toute sécurité les vestiges encore enfouis dans les profondeurs de l'Atlantique et d'en révéler enfin les secrets. ■

THÉA OLLIVIER

Le Monde Afrique

Retrouvez en ligne l'ensemble de nos contenus



Le professeur Ibrahima Thiaw, dans les réserves de l'Institut fondamental d'Afrique noire, à Dakar, le 10 septembre. SYLVAIN CHERKAOUI POUR « LE MONDE »

Au Sénégal, l'approche décoloniale des archéologues de la traite négrière

« REDÉCOUVRIR L'AFRIQUE » - 5/5 - Une équipe de chercheurs explore l'île de Gorée, au large de Dakar, afin de rompre avec les récits hérités de la colonisation et entretenus par la recherche occidentale

De la poussée d'Archimède à la physique quantique, un ouvrage de vulgarisation scientifique incontournable.

L'équation de la chauve-souris

Par l'auteur du **GRAND ROMAN DES MATHS** et du **THÉORÈME DU PARAPLUIE**
DEJA 200 000 LECTEURS

Hugo+Doc
© HUGO PUBLISHING