

science Le Monde & médecine



Un employé de la maison de ventes aux enchères Christie's tient une tête de robot ayant les traits d'Albert Einstein, développée par Hanson Robotics en 2005. A Londres, le 29 novembre 2024. WIKTOR SZYMANOWICZ/NURPHOTO VIA AFP

Intelligence artificielle : jusqu'où ira-t-elle ?

Alors que les Etats-Unis annoncent des investissements massifs dans l'IA et qu'apparaît sur le marché le chinois DeepSeek, cette technologie affiche une santé éclatante. Pourtant, la question d'une intelligence supérieure se pose, avec son lot d'inquiétudes concernant son autonomie. Etat des lieux

DAVID LAROUSSERIE ET NICOLAS SIX, AVEC ALEXANDRE PICARD

La vague de l'intelligence artificielle (IA) ne faiblit pas. A peine l'entreprise OpenAI, aux Etats-Unis, avait-elle annoncé vouloir investir massivement, avec des partenaires, 500 milliards de dollars sur cinq ans, dans des infrastructures dévolues à ces calculs, qu'une start-up chinoise jouait les trouble-fêtes. DeepSeek a proposé un logiciel plus économique et tout aussi performant, du moins si l'on fait abstraction de trous volontaires dans sa connaissance, liés à la censure chinoise.

Jusqu'à quand les performances augmenteront-elles ? Ces avancées, qualifiées d'intelligence artificielle, mèneront-elles par

extrapolation à des systèmes d'intelligence supérieure ou faudra-t-il pour y parvenir des innovations de rupture, comme le domaine en a déjà connu ? Les chantiers scientifiques et techniques ne manquent pas. D'autant qu'à ces progrès sur les « applications » – des programmes plus intelligents, plus autonomes, multimodaux, ou guidant des robots... – il faut ajouter des questions transversales majeures, encore ouvertes.

Comment limiter les erreurs de ces outils et les rendre plus explicables ? Comment se prémunir contre les mauvais usages, ou les risques systémiques que les progrès récents accentuent ? Et la question du coût environnemental ? De quoi nourrir les réflexions des acteurs institutionnels ou industriels qui auront pour mission de poursuivre

l'élaboration des politiques de régulation lors du Sommet pour l'action sur l'intelligence artificielle, les 10 et 11 février à Paris. Devant cette accélération, un état des lieux, forcément provisoire et partiel, s'impose.

Une course à la taille infinie ?

A en croire les tests d'évaluation, les systèmes d'IA générative font des progrès constants en matière d'« intelligence ». En 2020, le meilleur modèle de traitement du langage (Large Language Model, « grand modèle de langage », LLM) répondait avec succès à 48,9 % des questions d'un questionnaire à choix multiple de culture générale (test Measuring Massive Multitask Language Understanding).

→ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

La radiothérapie Flash, espoir face à certains cancers

L'Institut Curie construit une nouvelle machine, non encore testée sur l'homme, pour viser les tumeurs de mauvais pronostic

PAGE 2



L'astéroïde Bénou était gorgé d'eau

L'analyse des échantillons rapportés en 2023 par la sonde Osiris-REx révèle la présence de sels, résidus d'évaporation, et d'acides aminés nécessaires à la vie

PAGE 3



Entretien Une nouvelle ère pour les forages océaniques

Gilbert Camoin prône la coopération internationale pour ces recherches coûteuses

PAGE 8

Cancers de mauvais pronostic : le pari de la radiothérapie Flash

RECHERCHE - L'Institut Curie prévoit la construction d'un irradiateur de faisceaux d'électrons de très haute énergie, opérationnel en 2026

Frapper vite et fort les tumeurs. Tel pourrait être le mot d'ordre d'une nouvelle stratégie d'administration des radiations ionisantes, la « radiothérapie Flash ». Un projet aussi innovant qu'audacieux, annoncé par l'Institut Curie à l'occasion de la Journée mondiale contre le cancer, mardi 4 février. Il prévoit la construction, à l'hôpital d'Orsay (Essonne), d'un irradiateur de faisceaux d'électrons de très haute énergie, qui devrait être opérationnel en 2026.

Comme son nom l'indique, la radiothérapie Flash consiste à exposer les tumeurs à des durées de rayonnement extrêmement courtes (1000 à 10000 fois plus brèves que lors d'une radiothérapie conventionnelle), mais avec des rayons 10 à 15 fois plus intenses. L'objectif est de viser les tumeurs de mauvais pronostic.

Car cette stratégie n'a encore jamais été évaluée chez des patients. Les essais chez l'être humain ne devraient commencer en effet qu'en 2028. Pour autant, de grands centres de traitement du cancer parient déjà sur cette approche, au point d'investir dans de grands équipements. Le coût du projet de l'Institut Curie, études précliniques comprises, s'élève ainsi à 37 millions d'euros, financés par le plan d'investissement d'avenir France 2030 (35 millions d'euros) et par la région Ile-de-France (2 millions d'euros).

Pour justifier une telle mise de fonds, il faut en espérer d'importants bénéfices thérapeutiques. Les promesses sont triples. Premier enjeu, cibler des tumeurs logées en profondeur (jusqu'à 20 ou 30 centimètres sous la peau) ou à proximité d'organes vitaux – des tumeurs du cerveau, du poumon, du pancréas, par exemple – mais aussi des tumeurs touchant des enfants. Cela, tout en limitant les séquelles des rayons – c'est le deuxième enjeu. Troisième promesse, diminuer le nombre et la durée des séances de radiothérapie, donc la fatigue et les coûts de transport associés.

« Prudence »

« C'est un vrai changement de paradigme, qui a pour ambition de guérir plus de patients atteints de cancers de mauvais pronostic, relève Gilles Créhange, chef du département de radiothérapie oncologique de l'Institut Curie, qui coordonne ce projet. En diminuant la toxicité, la radiothérapie Flash devrait permettre d'augmenter les doses d'irradiation sans causer de dommages. »

Témoin de ces espoirs, plus de dix articles sur cette nouvelle technique sont publiés chaque mois. Et la radiothérapie Flash rassemble chaque année en congrès des physiciens, des biologistes, des ingénieurs et des médecins du monde entier.

« Ce projet est né dans un laboratoire de l'Institut Curie, à Orsay, au début des années 2000 », raconte Alain Puisieux, président du directoire de l'Institut Curie. Un chercheur, Vincent Favaudon, y fait une observation inattendue. Des doses d'irradiation fractionnées créent les mêmes dommages qu'une irradiation conventionnelle sur des cellules tumorales en culture, mais en épargnant les cellules saines.

En 2014, il publiera la première démonstration de cet « effet Flash » chez la souris. Chez ce

LA RADIOTHÉRAPIE FLASH, UN PROJET INNOVANT À L'INSTITUT CURIE

Caractéristiques techniques

Rayonnement jusqu'à **10 000 fois** plus rapide qu'une radiothérapie conventionnelle

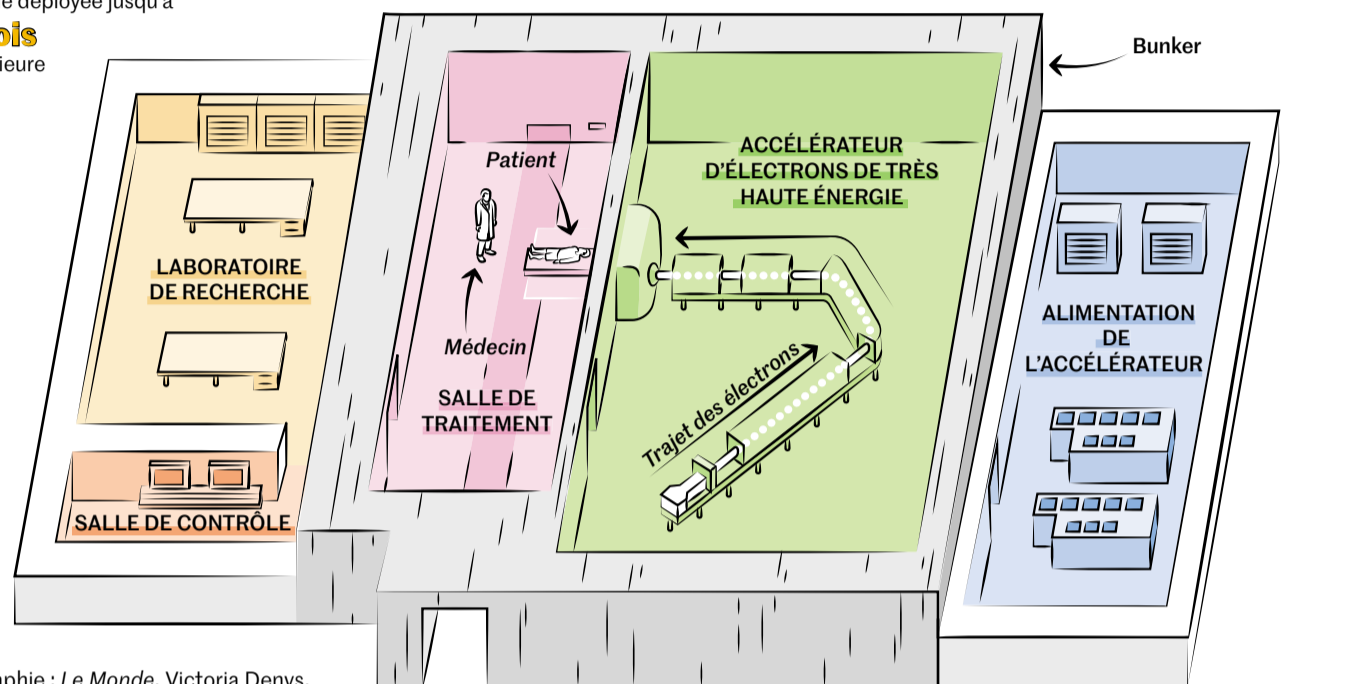
Energie déployée jusqu'à **15 fois** supérieure

Bénéfices thérapeutiques attendus de la radiothérapie flash

Atteinte des tumeurs profondes

Préservation des organes et tissus sains : moins de séquelles

Séances moins longues et moins nombreuses



Infographie : Le Monde, Victoria Denys, Florence Rosier

Source : Institut Curie

rongeur, ce mode d'irradiation inhibe la croissance de tumeurs pulmonaires avec la même efficacité qu'une irradiation conventionnelle, mais sans déclencher de fibrose dans les poumons (un excès de tissu fibreux, entraînant une gêne respiratoire) ni léser la peau.

En 2020, la radiothérapie Flash se montre efficace pour traiter des cancers ovariens de souris, tout en réduisant la toxicité gastro-intestinale et la mortalité associée. La même année, l'équipe de Charles Fouillade, radiothérapeute et chercheur à l'Institut Curie, explore le mode d'action de cette irradiation éclair sur les poumons normaux de souris. « La radiothérapie Flash réduit les dommages sur l'ADN dans les cellules normales du poumon, explique-t-il. Elle préserve aussi les cellules souches de cet épithélium pulmonaire, donc sa capacité de régénération. »

Mais comment expliquer les dommages préférentiels sur les tissus cancéreux ? « Ce n'est pas entièrement clair, admet Charles Fouillade. On a suspecté le rôle de l'oxygène, un puissant radiosensibilisant, mais l'hypothèse n'a pas été confirmée. »

En 2017 et en 2023 respectivement, des équipes suisse et américaine ont étudié comment l'irradiation du cerveau affectait – ou pas – les facultés cognitives de souris normales. Verdict : avec la radiothérapie Flash, les capacités d'apprentis-

sage et la mémoire des rongeurs sont préservées, mais pas avec la radiothérapie conventionnelle. L'effet protecteur, en mode Flash, semble lié à une baisse de la neuro-inflammation et au maintien de la plasticité des synapses, ces zones de communication entre les neurones.

Un signal d'alerte a toutefois émergé en 2022. Chez trois des sept chats atteints de cancers spontanés du museau, une dose unique de radiothérapie Flash a provoqué une nécrose de l'os maxillaire, neuf à quinze mois après ce traitement. Cette toxicité tardive incite à « faire preuve de prudence », estime Marie-Catherine Vozenin, de l'université de Lausanne (Suisse), à l'origine de ce travail.

Un bunker déjà construit à Curie

C'est pourquoi il restera bien des travaux à mener, une fois l'accélérateur construit, avant de pouvoir lancer de premiers essais cliniques. Une série d'étapes sont à cocher, en partenariat avec le Commissariat à l'énergie atomique. Des physiciens devront mettre au point des équipements de dosimétrie et d'imagerie, ainsi que des protocoles de radioprotection. Le projet de Curie bénéficie d'un bunker déjà construit : celui qui entoure une des trois salles de traitement par protonthérapie, aujourd'hui inutilisée, de l'hôpital d'Orsay. Un blindage indispensable.

Les radiobiologistes, eux, devront disséquer les impacts biologiques de l'effet Flash sur des modèles animaux, tout en définissant les doses de traitement optimales. Car tout sera à refaire. Jusqu'à présent, en effet, la grande majorité des travaux sur l'effet Flash ont utilisé des accélérateurs d'électrons de basse énergie, « avec lesquels on ne peut traiter que des tumeurs superficielles », souligne Gilles Créhange.

Direction Villejuif, maintenant, dans le Val-de-Marne. A 25 kilomètres au nord d'Orsay, l'Institut Gustave-Roussy, premier centre de lutte contre le cancer d'Europe, mise lui aussi sur l'effet Flash. Il évaluera d'abord, première étape, l'innocuité de cette approche, mais en utilisant une source d'électrons de basse énergie. « D'ici à la fin de 2025, nous espérons lancer un premier essai clinique sur une dizaine de patients atteints de cancers de la peau », précise Eric Deutsch, chef du département de radiothérapie de Gustave-Roussy.

Cet institut développe en parallèle son propre projet d'accélérateur d'électrons de haute énergie. Son projet, retenu par un jury international fin 2023, sera financé à hauteur de 38 millions d'euros par le plan France 2030. Theryq, l'industriel à qui est confié ce chantier, fabriquera aussi l'accélérateur du CHU de Lausanne, qui explore également cette approche. ■

FLORENCE ROSIER

Un patch de cellules souches pour les insuffisants cardiaques

MÉDECINE - Une réserve de cellules musculaires accolée au cœur pourrait aider à sa contraction, selon des essais menés sur l'homme et le singe

Seulement 1 % des patients en insuffisance cardiaque sévère bénéficient d'une transplantation du cœur, indique Wolfram Zimmermann, chercheur au Centre médical universitaire de Göttingen (Allemagne). « Nous cibons 99 % des autres patients, pour leur offrir une alternative », précise-t-il. Il dirige un essai clinique dont les premiers résultats, présentés le 29 janvier dans la revue *Nature*, suggèrent que des patches, contenant des centaines de millions de cellules cardiaques, pourraient aider les cœurs lésés à récupérer une part de leurs capacités contractiles.

L'étude, en plus des expérimentations conduites sur des macaques, expose le cas d'une patiente de 46 ans ayant vu ses capacités cardiaques décliner après un infarctus survenu en 2016. « En 2021 se posait la question pour elle de recevoir une pompe artificielle

implantée dans le thorax ou d'attendre une transplantation cardiaque, a expliqué Wolfram Zimmermann lors d'une conférence de presse, le 28 janvier. Elle a choisi d'avoir recours à nos patches. »

La procédure est bien moins invasive : une incision d'une dizaine de centimètres sur le côté du thorax permet d'introduire à travers les côtes une série de patches qui sont attachés au cœur par un système de sutures. Le collagène du patch, à l'instar de certains pansements chirurgicaux, le rend solide du cœur, et finit au bout de quelques semaines par être colonisé par un circuit vasculaire qui apporte l'oxygène aux cellules cardiaques qu'il emprisonne.

Celles-ci sont de deux types : une majorité de cardiomyocytes, qui assurent la fonction musculaire contractile, et d'autres assurant en quelque sorte l'intendance physiologique. Les deux lignées sont

dérivées de cellules souches pluri-potentes induites, des cellules adultes dont le destin fonctionnel a été reprogrammé. La première patiente a ainsi reçu 200 millions de cellules provenant d'un donneur – on parle d'« allogreffe », par opposition aux « autogreffes », qui s'appuient sur les propres cellules du patient.

Augmenter les doses

Elle a bien toléré ces patches, mais a bénéficié, trois mois après l'opération, d'une transplantation cardiaque, réalisée par le chirurgien de l'équipe. Les chercheurs ont ainsi pu récupérer son cœur et étudier la façon dont les patches s'étaient incorporés à sa surface. Son état les a rassurés sur la possibilité d'augmenter les doses à 400 millions de cellules pour les patients suivants – quinze sont à ce jour suivis par l'équipe.

A la lumière de la bonne tolérance observée, Wolfram Zimmermann espère pouvoir passer rapidement à l'essai de phase 3, pour mesurer les bénéfices cliniques. « Nous faisons l'hypothèse que le muscle constitué par l'implant contribue à la performance contractile du cœur, dit-il. C'est ce qu'on observe chez les singes, et que nous voulons explorer chez les patients. »

« Je suis cet essai clinique avec grand intérêt », commente Philippe Menasché, chirurgien cardiaque à l'hôpital Georges-Pompidou (AP-HP), à Paris, qui a fréquemment échangé avec l'équipe allemande, notamment en lien avec ses propres travaux conduits dans les années 2010 sur l'utilisation de cardiomyocytes dérivés de cellules souches non pas adultes, mais embryonnaires. « La tolérance de leurs patches est excellente, mais il est trop tôt pour se prononcer sur les résultats fonctionnels », dit-il.

Les patches nécessitent en outre l'administration de traitements antirejet. L'équipe allemande a constaté que des patches autologues – faits de cellules dérivées des propres cellules du receveur – entraînaient chez les macaques des réactions immunitaires de rejet plus fortes que les allogreffes. Des questions de coût l'amènent aussi à préférer ces dernières, qui permettent de constituer des réserves de patches disponibles « sur étagère ».

Philippe Menasché s'interroge sur l'origine du regain de contractilité observé par ses confrères allemands. La quasi-absence d'une molécule impliquée dans la coordination des contractions, la connexine, le conduit à penser que la vascularisation, en permettant le passage de facteurs biologiques du patch vers le receveur, pourrait jouer un rôle dans la récupération du muscle cardiaque du receveur.

Une hypothèse en lien avec une piste de recherche qu'il suit désormais : utiliser non pas les cellules elles-mêmes, mais leurs sécrétions – des milliers de protéines et des vésicules extracellulaires bourrées de micro-ARN – pour stimuler les fonctions du cœur lésé.

Son équipe a publié une première étude de cas en 2024 dans *The Lancet*. Ces « jus cellulaires » ou sécrétome font l'objet de dizaines d'essais cliniques dans le monde, sur une grande diversité d'organes. Ils peuvent être administrés par simple injection dans le circuit sanguin.

Alors, patches ou jus de cellules ? « Les deux approches pourraient être complémentaires en fonction du type de patient », indique le chirurgien cardiaque français, qui nourrit un enthousiasme prudent sur les perspectives de ces thérapies cellulaires. ■

HERVÉ MORIN

Des sels et des briques du vivant sur Bénou

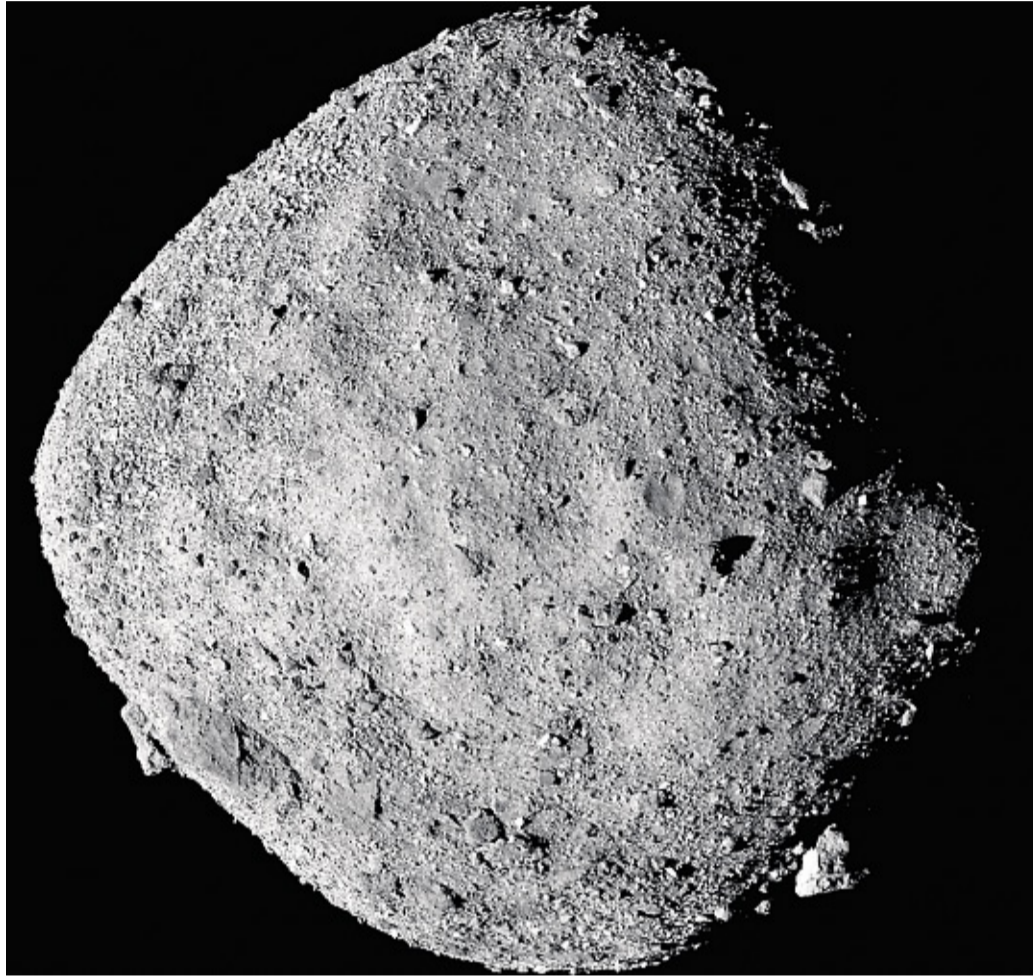
ASTRONOMIE - Les premières analyses des échantillons ramenés sur la Terre montrent que l'astéroïde contient une gamme très variée de sels et des molécules organiques

Vous souvenez-vous d'Osiris-REx? Cette sonde de la NASA qui, après un voyage de plus de 6 milliards de kilomètres dans l'espace, a, en septembre 2023, largué sur Terre une capsule contenant des échantillons prélevés sur l'astéroïde Bénou. Il avait fallu attendre plusieurs mois et la fabrication d'outils adaptés pour avoir enfin accès au précieux chargement en janvier 2024. Un an plus tard, le temps des premières analyses poussées sur une fraction des 121,6 grammes d'échantillons, la science commence à parler : deux articles publiés mercredi 29 janvier, l'un par *Nature*, l'autre par *Nature Astronomy*, et rédigés par des équipes internationales révèlent que Bénou est à la fois riche en sels et en certaines molécules organiques que l'on considère sur Terre comme des briques du vivant.

Cosmochimiste, professeur à l'université Côte d'Azur (UCA), Guy Libourel étudie les corps extraterrestres que sont les météorites et fait « parler les minéraux qu'elles contiennent pour obtenir des informations sur l'histoire primitive du Système solaire », il y a près de 4,6 milliards d'années, soit avant même que la Terre n'apparaisse. Bénou garde la mémoire de cette époque reculée, étant un agrégat de roches issues de la fracturation d'un « corps-parent » primitif. Guy Libourel et ses collègues ont mené une des nombreuses analyses décrites dans *Nature*. Pour cela, ils ont reçu des grains de Bénou, soit un dixième de gramme d'échantillons. « Cela peut sembler très peu mais, pour nous, c'est énorme. Avec nos outils qui descendent au niveau du micron voire moins, c'est comme si on se trouvait au milieu d'un terrain de foot. »

« Variations infinitésimales »

Ces grains ont été confiés à un laboratoire spécialisé dans « la nanocaractérisation de la matière », le Crhea, ou Centre de recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CNRS-UCA) à Sophia Antipolis (Alpes-Maritimes), qui exploite un phénomène nommé « cathodoluminescence » : « On envoie un faisceau d'électrons sur la matière, qui va réagir en émettant des photons dont la longueur d'onde nous donne des informations chimiques et structurales », précise Guy Libourel. On peut voir des variations infinitésimales que les autres microscopes ne perçoivent pas. »



Le 2 décembre 2018, image de l'astéroïde Bénou, fournie par la NASA. AP

Dévoilées dans l'article de *Nature*, les analyses menées en France ainsi que celles conduites par les équipes internationales montrent, pour résumer grossièrement, que le corps-parent de Bénou a baigné dans la saumure. De l'eau était présente dans cet astéroïde, circulait dans ses roches et a fini par s'évaporer, laissant une gamme très variée de sels – carbonates, sulfates, fluorures –, un peu comme on produit du sel dans un marais salant.

Fruit d'une autre collaboration scientifique, l'étude publiée dans *Nature Astronomy* se consacre, quant à elle, non pas à la chimie minérale, mais à la chimie organique dont les échantillons de Bénou gardent la trace. Ses auteurs ont ainsi détecté des milliers de molécules différentes contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote. Parmi elles, quatorze des vingt acides aminés qui figurent dans les cellules de tous les êtres vivants terrestres. Autre découverte importante : la

présence des cinq nucléobases qui forment les barreaux dans les hélices d'ADN et d'ARN.

« Série de questionnements »

La richesse de cette chimie organique n'est pas une surprise car de telles molécules ont déjà été mises en évidence dans des météorites ou dans les échantillons de l'astéroïde Ryugu, rapportés par la mission japonaise Hayabusa-2. Cependant, quand on met face à face les résultats de ces deux études – l'eau et les sels minéraux d'un côté, les briques du vivant de l'autre –, on ne peut que se demander, comme le dit Guy Libourel si ces deux chimies ont eu « des relations sympathiques ou pas ». Si les saumures ont fourni un environnement favorable à l'apparition des molécules organiques ou si « les deux sont complètement décorrélés ».

Mais le chercheur n'entre pas dans ce jeu d'hypothèses, notant que les travaux publiés le 29 janvier avaient d'abord pour but « de faire l'inventaire des molécules existant

sur Bénou, parce qu'on ne peut pas élaborer de modèle si on ne sait pas de quoi on part. Ces deux études permettent de donner un cadre, un paysage. Toute une série de questionnements vont ensuite se brancher sur ces observations ».

Aucune d'elles n'aurait été possible sans aller recueillir les échantillons sur place et sans les stocker, une fois revenus sur Terre, dans des conditions drastiquement contrôlées car certaines des molécules détectées se dégradent au contact de notre atmosphère. Les deux études sont un plaidoyer pour la poursuite de ces aventures spatiales, « en ciblant des astéroïdes différents pour avoir une bonne diversité d'objets », souligne le cosmochimiste de l'UCA, qui repense avec émotion à la sonde Osiris-REx : « C'est quand même fort de café qu'elle soit allée récolter 120 grammes de cailloux à 300 millions de kilomètres et que moi, Guy Libourel, je les analyse à Sophia Antipolis avec mes collègues. C'est le bon côté de l'humanité. » ■

PIERRE BARTHÉLÉMY

TÉLESCOPE

MÉDECINE

La FDA approuve un antidouleur non opioïde

L'agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux vient d'approuver un nouvel antidouleur non opioïde, le Journavx, du laboratoire Vertex Pharmaceuticals. Une première depuis plus de vingt ans. Ce médicament soulage la douleur tout en n'entraînant pas de risques d'addiction et de surdose, contrairement aux opioïdes. Il agit en bloquant les protéines de signalisation de la douleur avant qu'elles n'atteignent le cerveau. Néanmoins, son prix est très élevé, 15,50 dollars (environ 15 euros) par comprimé. Par ailleurs, selon des essais cliniques, ce médicament serait moins efficace à long terme, c'est-à-dire en cas de douleurs chroniques.

BIBLIOMÉTRIE

8 000 des chercheurs les plus cités ont au moins une étude rétractée

Une équipe dirigée par John Ioannidis (université Stanford) a croisé une base de données des chercheurs appartenant aux 2 % les plus cités dans la littérature scientifique, et une liste de quelque 40 000 articles rétractés colligée par l'association Retraction Watch. Il apparaît que 8 000 de ces chercheurs ont au moins une étude rétractée. Soit 3,3 % et 4 % de cette population, si l'on prend respectivement en compte toute la carrière ou la seule année 2023. Les taux de rétraction sur le critère de la carrière entière sont plus élevés dans les pays en développement (66,7 % au Sénégal), mais la Chine (8,2 %) et l'Inde (9,2 %) se distinguent parmi ceux comptant le plus de scientifiques très cités. La France figure parmi les plus faibles taux de rétraction (2,2 %), Israël présentant le plus bas (1,7 %). Le motif de ces rétractations, qui ne sanctionnent pas forcément des inconduites scientifiques, reste à étudier.

> Ioannidis et al., « Plos Biology », 30 janvier.

246

C'est le nombre de start-up spécialisées en oncologie en France, selon « New Frontiers in Oncology », une étude publiée lundi 3 février par l'Office européen des brevets. La France est, selon ce critère, le premier pays de l'Union européenne, devant l'Allemagne (208). Mais elle se situe derrière le Royaume-Uni (290). Avec près de 1 500 start-up consacrées à la lutte contre le cancer, l'Europe dépasse les Etats-Unis (1 325). Pour autant, sur les secteurs de forte croissance telles l'immunothérapie cellulaire, où le nombre de demandes de brevets a augmenté à un taux annuel moyen de + 37,5 % entre 2015 et 2021, la thérapie génique (+ 31 %) et l'analyse d'images (+ 20 %), cette étude souligne que la France et l'Europe perdent du terrain par rapport aux Etats-Unis et à la Chine.

La prévention du cancer du col de l'utérus progresse

SANTÉ PUBLIQUE - En France, plus d'une fille de 15 ans sur deux a reçu au moins une dose de vaccin contre les papillomavirus humains

En 2023, on dénombrait environ 3 100 nouveaux cas de cancer du col de l'utérus en France et 1 100 décès. « Un problème de santé publique », souligne Santé publique France (SPF) dans son dernier *Bulletin épidémiologique hebdomadaire (BEH)*, paru mardi 4 février.

A l'occasion de la Journée mondiale de lutte contre le cancer, ce mardi, l'agence de santé dresse un état des lieux de la vaccination et du dépistage et fait une analyse des disparités territoriales. Elle rappelle au passage que la vaccination contre les papillomavirus humains (HPV) est une « mesure de prévention primaire essentielle ». Depuis 2007, le vaccin est en effet recommandé pour les filles (depuis 2019 pour

les garçons) de 11 à 14 ans, avec l'administration de deux doses. Un rattrapage étant possible avec trois doses de 15 à 19 ans.

Selon l'Institut national du cancer, 100 % des cancers du col de l'utérus sont dus aux infections à HPV, deux types de ces virus étant responsables de la majorité de ces tumeurs. Les HPV sont très contagieux : 80 % des femmes et des hommes y sont exposés au cours de leur vie. La probabilité d'être contaminé par un HPV en ayant eu un seul partenaire sexuel avant 25 ans est de 50 % ; avec deux partenaires avant cet âge ce risque est de 85 %. D'où l'intérêt de vacciner avant l'entrée dans la vie sexuelle, même si dans la plupart des cas le virus est éliminé par le système immunitaire. Pour

booster le taux de vaccination, celle-ci est désormais proposée au collège, en classe de 5^e. L'objectif est d'atteindre 80 % d'enfants vaccinés contre les HPV en 2030.

Plusieurs publications ont montré un lien entre vaccination et réduction du risque de cancer du col de l'utérus. En 2020, une étude publiée dans *The New England Journal of Medicine* à partir du registre des cancers suédois de 2006 à 2017 montrait un risque de cancer inférieur chez les jeunes femmes ayant reçu au minimum une dose de vaccin (47 cas pour 100 000 chez les femmes vaccinées et 94 cas pour 100 000 chez celles non vaccinées).

Selon les chiffres de vaccination publiés par SPF, la couverture était estimée en 2023 à 54,6 %

pour au moins une dose chez les filles de 15 ans (48 % en 2022) et à 44,7 % pour deux doses chez celles de 16 ans. « Bien que ces chiffres soient en hausse depuis plusieurs années, des disparités territoriales importantes subsistent, notamment dans le sud de la France [environ 37 % pour deux doses en PACA et Corse] et les départements et régions d'outre-mer [14,1 % à la Martinique] », souligne l'agence.

Dépistage recommandé

En complément de la vaccination, un dépistage régulier du cancer du col de l'utérus est recommandé chez toutes les femmes entre 25 et 65 ans. En 2018, un programme national de dépistage a été instauré avec comme objectif de réduire l'incidence et la morta-

lité par cancer du col de l'utérus de 30 % en dix ans. Un an plus tard, la Haute Autorité de santé préconisait dans ses recommandations de maintenir tous les trois ans un examen cytologique (examen des cellules prélevées lors d'un frottis du col de l'utérus) chez les femmes de 25 à 29 ans et de le remplacer par un test HPV réalisé tous les cinq ans pour les femmes de 30 à 65 ans.

Selon le BEH, le taux de couverture triennal a atteint 59,5 % entre 2020 et 2022, en augmentation par rapport aux périodes précédentes (56,6 % pour la période 2017-2019). « Toutefois, il est très en deçà des objectifs fixés par l'Organisation mondiale de la santé (70 % des femmes dépistées à 35 et 45 ans) et du taux de couverture

européen du dépistage acceptable (75 %) », relève SPF.

Dans son bilan « Participation au programme de dépistage organisé du cancer du col de l'utérus » publié début juillet 2024, l'agence de santé publique faisait état de disparités significatives. Ainsi, parmi les régions où les taux de couverture étaient les plus élevés, figuraient la Bretagne (67,1 %), la région Auvergne-Rhône-Alpes (66,3 %) et La Réunion (64 %). Parmi les plus faibles, on retrouvait l'Île-de-France (53,1 %), avec un département dans lequel le taux de couverture est inférieur à 50 % : la Seine-Saint-Denis (45,3 %), ainsi que des régions d'outre-mer (Guadeloupe 44,5 %, Martinique 40,0 %, Guyane 31,7 %). ■

NATHALIE BRAFMAN

Les pistes pour rendre les IA plus intelligentes

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

Puis à 60 % deux ans plus tard. A 74,1 % fin 2022, au moment de l'arrivée de ChatGPT. Puis à 86,4 % moins de six mois plus tard. Désormais, plus de 88 % des réponses sont correctes. Cette croissance est la même sur toute une batterie de tests qui sert d'étalon à chaque nouvelle sortie de modèle génératif.

Il existe même une loi générale qui s'est empiriquement dessinée, comme la loi de Moore sur le doublement de la puissance de calcul des puces tous les dix-huit mois. En 2020 et 2022, des équipes d'OpenAI et de DeepMind faisaient un lien entre le volume de données d'apprentissage, la performance et la taille des modèles. Cette taille double tous les six mois environ.

DeepSeek-V3, le dernier modèle d'une entreprise chinoise qui a chamboulé la hiérarchie fin janvier, n'échappe pas totalement à ce principe : avec 14,8 mille milliards de *tokens* (des sous-divisions de mots) utilisés pour son apprentissage et plus de 671 milliards de paramètres pour fonctionner, il est dans le haut du panier en taille, du moins en comparaison avec les modèles d'entreprise ayant communiqué ces informations. Mais il a demandé moins de ressources informatiques pour son développement, relativisant les investissements délirants nécessaires pour obtenir les meilleures performances.

Même avant l'arrivée de DeepSeek, cette course à l'armement irritait. En septembre 2024, dans un article mis en ligne, trois grands spécialistes du secteur, Gaël Varoquaux (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), Alexandra Sasha Luccioni (Hugging Face) et Meredith Whittaker (Signal), dénonçaient le paradigme du « plus c'est gros, mieux c'est ». « Nous ne réfutons pas l'existence de ces lois d'échelle, mais nous contestons l'utilité des gros modèles pour un grand nombre de tâches pratiques », souligne Gaël Varoquaux. L'article note ainsi que dans bien des domaines, imagerie médicale, science des données, vision par ordinateur ou traitement du langage, les méthodes maximalistes saturent. Quand des méthodes alternatives aux grands modèles existent et sont souvent meilleures.

En décembre 2024, une équipe constituée des chercheurs de LightOn, de Hugging Face, d'Answer.ai et de l'université Johns-Hopkins a revisité un dinosaure, le modèle BERT de Google, première incarnation de l'architecture aujourd'hui dominante, les « transformeurs ». Ils l'ont amélioré, « profitant de cinq ans de développement technologique », explique Iacopo Poli, de LightOn. ModernBERT fait la même taille que BERT, moins de 500 millions de paramètres, mais il excelle pour reconnaître des entités dans

des textes et retrouver de l'information, sur une carte graphique loin d'être la plus performante.

Cette course a aussi des conséquences néfastes en limitant le champ des recherches. « On se ferme scientifiquement à des questions. En science des données, les questions des relations de causalité entre différents facteurs sont capitales, par exemple en santé, mais elles sont laissées de côté, critique Gaël Varoquaux. Il faut de la recherche pour attaquer ces problèmes, pas des modèles plus gros. »

Le débat fait rage sur la poursuite de cette croissance et le risque de saturation. Il est vrai que la quantité de textes disponible pour l'entraînement pourrait ralentir la croissance. Tout comme l'augmentation exponentielle des ressources met en tension les infrastructures. Le groupe de chercheurs Epoch AI, qui compile les informations sur les modèles de langage, estime que « le stock de textes pourrait être complètement utilisé entre 2026 et 2032 ».

A l'inverse, les ingénieurs rivalisent pour mieux mettre à profit les ressources. DeepSeek a ainsi amélioré son architecture pour réduire les coûts d'entraînement. Plusieurs techniques permettent aussi de réduire la taille des modèles, sans trop perdre en qualité. DeepSeek, toujours, a eu recours à l'une d'elles, la distillation, pour transformer des modèles open source, LLaMa de Meta et Qwen d'Alibaba, en modèles plus petits, jusqu'à 440 fois, mais imitant leurs performances.

De nouvelles architectures fleurissent aussi, comme Mamba, Hyena ou des systèmes travaillant sur les lettres et plus seulement sur les *tokens*, pour gagner encore en efficacité. Mais elles n'ont pas le même potentiel de rupture que celle introduite par OpenAI le 12 septembre 2024...

Des IA qui raisonnent ?

Ce jour-là, l'entreprise américaine annonce un changement de paradigme pour son dernier modèle, baptisé o1. Bien qu'il soit improprement décrit comme capable de « raisonner », il est le premier à mettre en œuvre une technique rendue publique par Google en janvier 2022, qui permet de prolonger la croissance des performances.

DANS BIEN DES DOMAINES, LES MÉTHODES MAXIMALISTES SATURENT. QUAND DES MÉTHODES ALTERNATIVES EXISTENT ET SONT SOUVENT MEILLEURES



Jusqu'à présent la qualité des grands modèles de langage dépendait de leur « entraînement », directement corrélé au volume de données utilisées pour cette phase consistant à prédire le mot suivant dans des phrases. Produire une réponse, aussi appelée « inférence », consistait à activer les milliards de paramètres du modèle qui étaient figés après l'apprentissage.

L'idée de Google est de faire produire par le système une « chaîne de pensée », c'est-à-dire une série d'étapes logiques à suivre pour aboutir à la réponse. Par exemple, pour répondre à « Combien de frappes au clavier pour écrire tous les nombres de 1 à 500 ? », le modèle apprend à décomposer le problème et à proposer ce genre de réponse : « Il y a 9 chiffres de 1 à 9. Il y a 90 nombres à deux chiffres entre 10 et 99. Et il y a 401 nombres à trois chiffres entre 100 et 500. La réponse est donc $9 + 90 \times 2 + 401 \times 3 = 1392$ ».

Ce séquençage du problème améliore la réponse finale. Il augmente aussi le temps d'inférence. Mais comme l'avait constaté une équipe de DeepMind, cinq semaines avant la publication d'OpenAI, ce temps plus long est comme un temps d'entraînement en plus. Plus il augmente, meilleure est la performance.

OpenAI puis récemment DeepSeek ont automatisé cette nouvelle phase d'inférence en apprenant à leur modèle, à l'aide d'exemples, à élaborer ce cheminement. Cet entraînement recourt à la technique d'apprentissage par renforcement, utilisée en 2016 par DeepMind pour gagner au jeu de go, qui permet de trouver, par un système de récompenses, la meilleure stratégie possible. Dans ses communiqués, OpenAI dévoile la croissance des performances en fonction du temps de « raisonnement », donc en fonction des phrases générées pour l'explication.

Grâce à ces innovations, les modèles de raisonnement comme o1 font mieux que ceux à inférence constante pour certains problèmes complexes qui font plus appel à la logique. Le défaut est que les réponses arrivent plus lentement.

Ce progrès n'a cependant pas ébranlé les esprits convaincus, depuis longtemps, que les modèles de langage et les IA génératives ne suffiront pas à aller vers plus d'intelligence. Yann Le Cun, un des pionniers du domaine, directeur scientifique de l'IA à Meta, a lancé à son auditoire à l'université de Genève, le 11 octobre 2024 : « Ne travaillez pas sur les LLM ! » Pour lui, cette mode va passer d'ici à « cinq ans », car ils sont insuffisants pour progresser sur le chemin de systèmes plus intelligents, qu'on voudrait capables d'abstraction, de planification, d'invention de nouvelles solutions, ou de se représenter le monde physique et ses lois.

« Il nous faut de nouvelles idées et elles ne viendront pas de gens travaillant sur les LLM », avait dit aussi François Chollet, ancien de Google, lors d'une autre conférence, AGI-24, à Seattle, en août 2024. L'ingénieur français a créé en janvier un nouveau laboratoire de recherche, NDEA, pour creuser ces idées. Il avait aussi mis au point, dès 2020, le test d'intelligence nommé ARC-AGI, fait d'exercices de géométrie testant les capacités d'abstraction de l'utilisateur. A ce test, ni o1 ni DeepSeek n'ont brillé : leurs scores sont respectivement de 20 % à 30 % de réussite pour le premier et de 15 % pour le second. L'humain peut dépasser les 95 %.

Mais, en décembre 2024, OpenAI sort en démonstration o3, qui monte jusqu'à 88 % ! Le blog

DES PROGRÈS RAPIDES POUR LES SCIENCES

Par deux fois en 2024, le jury Nobel a insisté sur l'étroitesse des relations entre l'intelligence artificielle (IA) et la science. Il a primé, en chimie, le logiciel AlphaFold de Demis Hassabis et John Jumper de l'entreprise DeepMind, qui a amélioré la prédiction de la structure tridimensionnelle des protéines à partir de leurs séquences d'acides aminés. Il a aussi, en physique, récompensé Geoffrey Hinton et John Hopfield pour leurs contributions pionnières dans les années 1980 à l'apprentissage machine à partir de réseaux de neurones artificiels.

Chaque mois sont annoncés des progrès, sous forme de méthodes qui améliorent le quotidien des scientifiques, voire accélèrent le progrès des connaissances. Citons, pêle-mêle, les outils de prédictions météorologiques des sociétés Google ou Nvidia rivalisant désormais avec les moyens traditionnels. Ou les logiciels AlphaGeometry et AlphaProof de DeepMind, racheté par Google en 2014, qui résolvent des problèmes mathématiques complexes.

En physique des particules ou en détection d'ondes gravitationnelles, des modèles aident à trier dans les flots importants de données pour identifier des événements rares et intéressants. En astronomie, des programmes sont mis au point pour piloter les futurs télescopes. En physique quantique, des méthodes à bases de réseaux de neurones, mises au point à partir de 2016, promettent de résoudre le problème difficile de l'interaction entre de multiples particules, qui permettraient de prévoir les propriétés de matériaux, sans les fabriquer. Et peut-être de battre les ordinateurs quantiques dans cette course.

« On ne sait pas où ça va finir »

En santé et médecine, la liste ne cesse de s'allonger des réussites ou premiers pas prometteurs pour aider au diagnostic, repérer de nouvelles molécules, identifier les meilleurs traitements. Même en archéologie, le recours à l'IA se répand, pour déchiffrer des parchemins par exemple.

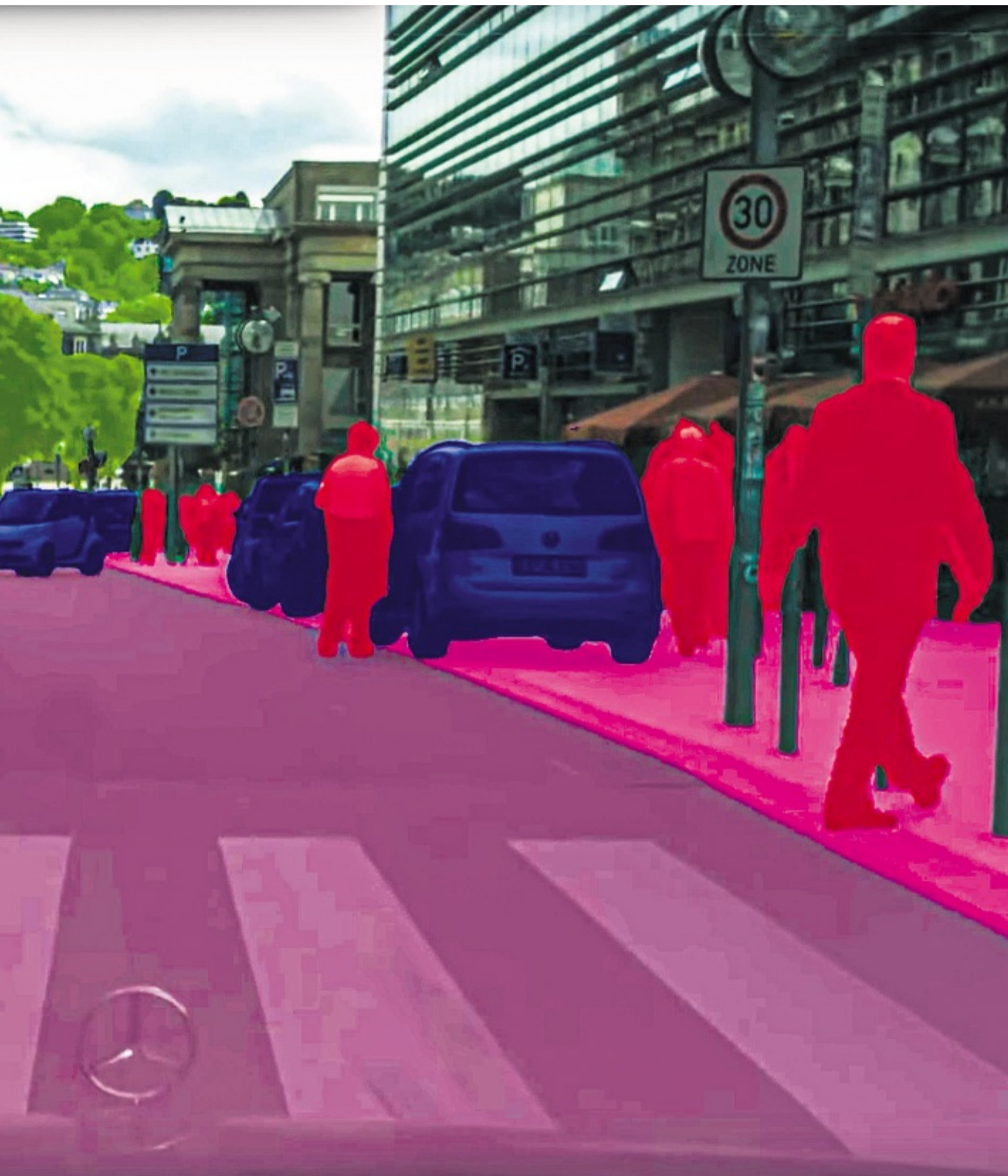
Précisons que toutes ces innovations ne relèvent pas d'une requête à ChatGPT, telle que la formuleraient un adolescent pour résoudre un problème de calcul. La palette des outils est bien plus large. AlphaFold utilise l'architecture Transformer, centrale pour ChatGPT et ses concurrents, mais d'autres modules d'IA sont utilisés. La prédiction météo utilise des techniques d'IA générative développée pour les images. Certaines applications n'utilisent ni Transformer, ni modèles de langue, ni IA génératives, mais recourent à de l'apprentissage par renforcement, ou à de l'apprentissage profond géométrique, qui travaille sur des graphes de données. Elles reposent aussi souvent sur des bases de données – en chimie, biologie, mathématiques, etc. – élaborées par la recherche académique depuis des années, et tiennent compte des connaissances des lois de la nature.

« On ne sait pas où ça va finir. Les progrès de l'IA sont plus rapides que nos recherches ! », constate Lenka Zdeborova, professeure à l'Ecole polytechnique

fédérale de Lausanne. Le souci de cette physicienne n'est pas de développer des outils pour la recherche, mais de comprendre comment ils fonctionnent. « C'est comme avec la machine à vapeur. Elle a fonctionné avant même que nous ayons la théorie, la thermodynamique, pour bien décrire ce qui se passait », précise la physicienne. Pourquoi telle ou telle variation des ingénieurs sur un réseau de neurones a-t-elle de l'effet ? Peut-on faire mieux ? Quelles sont les limites ? Ces questions mobilisent une vaste communauté de chercheurs, qui s'interrogent par exemple sur les raisons des performances de ces transformeurs omniprésents dans les applications.

« Je ne sais pas si ces IA changent la méthode scientifique, mais je sais qu'elles changent déjà mon quotidien », indique Lenka Zdeborova. J'utilise ChatGPT tous les jours, comme un assistant à qui je pose des questions, demande des réponses, fait corriger des courriers... Cette interaction est très intéressante. » ■

D. L.



Capture d'écran d'une vidéo de démonstration d'EfficientViT, IA du MIT, qui pourrait permettre à un véhicule autonome d'identifier les objets avec précision. MIT NEWS/STILL COURTESY OF THE RESEARCHERS

se sont avérés convaincants jusqu'à en être inquiétants pour les artistes. Les titres générés sont non seulement crédibles en matière de structure et de mélodie, mais aussi dotés de voix et de paroles cohérentes. Ils souffrent beaucoup moins des tremblements et impuretés sonores qui entachaient les productions de son prédécesseur Suno v3.5. En revanche, le résultat est souvent éloigné de la requête initiale. Suno travaille actuellement à améliorer la compréhension des consignes rédigées par ses utilisateurs et à enrichir sa connaissance des styles musicaux.

La robotique mue par l'IA

La déferlante des MLLM pourrait bien bousculer un autre domaine, la robotique. C'est le postulat de plusieurs universitaires chinois, qui ont assemblé un panorama des recherches à la convergence de ces deux champs. L'objectif de leurs nombreux travaux est d'en finir avec les robots limités à quelques tâches et perdus en cas d'imprévu.

Les MLLM ont le potentiel d'améliorer la capacité de compréhension des environnements complexes des robots, leur aptitude, encore sommaire, à déchiffrer les instructions humaines, à raisonner, et à planifier. L'espoir est que, grâce à eux, un robot puisse se débrouiller seul lorsqu'on lui demandera : « Attrape le clavier à droite de la boîte de mouchoirs. » Des entreprises d'IA comme Hugging Face ou OpenAI ont récemment monté des équipes de robotique (2024) – le constructeur auto Tesla ou l'e-commerçant Amazon l'avaient fait il y a longtemps.

Pour atteindre un haut niveau d'autonomie, les robots auront besoin d'une compréhension profonde et intuitive de la physique du monde : gravité, relations spatiales et géométriques, permanence des objets, résistance et déformation des matériaux. C'est dans ce but que l'entreprise Nvidia a mis en chantier Cosmos, qu'elle appelle son « modèle du monde ».

Ce type de connaissances physiques sera nécessaire, selon des chercheurs de Harvard, pour améliorer leur propre modèle de planning vidéo langagier (Video Language Planning, VLP). Lorsque l'IA d'un robot hésite devant plusieurs choix, le VLP peut simuler visuellement les conséquences de chaque hypothèse sur le monde réel pour faire un choix. Un travail inachevé car, comme le déclarait Yann Le Cun au Forum économique mondial de Davos en janvier 2024, « un chat dispose aujourd'hui d'une compréhension du monde physique largement supérieure à celle des meilleures IA ».

Ces modèles physiques du monde sont d'autant plus stratégiques qu'ils servent une autre piste majeure d'avancée pour la robotique : la simulation. Ce procédé permet de limiter le recours aux vidéos d'entraînement en 3D haute qualité filmées dans le monde réel, coûteuses à produire. L'enjeu est de bâtir des simulateurs aux fondements physiques suffisamment réalistes pour qu'un robot puisse s'y entraîner avant de rejoindre le monde réel sans faire l'expérience de discordances – le Graal pour des projets comme VirtualHome, Isaac Sim, Matterport, Morse, PyBullet, Gazebo, etc.

Jensen Huang, le PDG de Nvidia, explique ainsi dans une interview, le 10 janvier à l'influenceuse américaine Tiff In Tech, qu'il est compliqué d'enseigner à un robot d'attraper un verre sans le casser, car l'objet verre existe dans d'innombrables tailles, formes et matériaux. Il suggère de combiner quelques démonstrations vidéo réelles à des milliers de simulations différentes, fabriquées rapidement et économiquement grâce à des outils de génération d'objets en 3D par IA générative.

Piste plus radicale encore : lâcher des robots dans le monde réel, pour qu'ils apprennent par essai-erreur – un scénario délicat, qui supposerait de les faire cohabiter avec des humains. Ou les plonger dans un monde entièrement simulé, relations sociales incluses, qui serait extraordinairement complexe à modéliser. Avec l'espoir, en ligne de mire, que ces apprentissages automatisés puissent faire passer un cap important aux intelligences artificielles génératives, bien au-delà de la robotique. Car, selon une partie de la communauté scientifique, un robot devrait apprendre comme le fait un humain, à travers un corps et des sens, plongé dans un monde physique et social. Et non uniquement dans le monde du langage. ■

DAVID LAROUSSE ET NICOLAS SIX, AVEC ALEXANDRE PICARD

du test ARC-AGI saluera sobrement cette prouesse : « C'est un pas important et étonnant dans la capacité des IA, effectuant des tâches jamais vues jusqu'à présent dans les modèles de type ChatGPT. » Et annonce d'ici à quelques semaines de nouveaux tests pour corser la difficulté.

Selon François Chollet, les modèles actuels sont bons pour représenter la connaissance et y trouver des organisations, mais ce n'est qu'une étape, assez éloignée de ce qu'il faut pour une intelligence plus complète. Il réfléchit à hybrider ces systèmes à d'autres, capables de générer des « programmes » par exploration du vaste paysage des solutions possibles.

Yann Le Cun défend, lui, une autre voie consistant à faire apprendre à un réseau de neurones un modèle du monde. Une idée simple pour y parvenir : montrer des vidéos de chutes d'objets à un modèle pour lui apprendre à générer des séquences originales respectant la chute des corps. Hélas, les images produites délirent au bout de quelques secondes... Le chercheur explore donc une idée, baptisée « enchâssement joint », qui consiste à faire apprendre au moyen de vidéos non pas une représentation figurative ou réaliste du monde, mais une représentation abstraite que seule la machine « comprend » et peut utiliser.

La course aux agents

Si les capacités de raisonnement récemment déployées par OpenAI ou DeepSeek ne convainquent pas tout le monde de leur intelligence, elles sont utiles pour des applications qui font l'objet d'une rude concurrence : les « agents ». A la différence des assistants conversationnels comme ChatGPT ou Gemini, dont le but est de dialoguer avec l'utilisateur, le terme désigne un programme capable d'exécuter plusieurs tâches, grâce à différents outils (un navigateur Web, une calculatrice, un exécuteur de code informatique, une reconnaissance de caractères, etc.), en planifiant ce qu'il doit faire, de façon autonome. Trouver un trajet en train et acheter le billet, analyser des courriels pour mettre à jour l'agenda, par exemple.

Tous les acteurs du secteur ont annoncé en 2024 développer des agents préentraînés ou des logiciels pour programmer leurs propres agents.

« L'une des difficultés, c'est l'orchestration des différentes tâches. Pour cela, nous utilisons des techniques de raisonnement présentes dans GPT-4o ou R1 de DeepSeek. Mais à la base, il faut aussi un bon modèle de langue », indique Laurent Daudet, président de LightOn, qui vient

CERTAINS ENVISAGENT QUE DES « AGENTS INTELLIGENTS » ÉCRIVENT LEUR PROPRE PROGRAMME D'IA, ET AINSI ACCÉLÈRENT LA CRÉATION D'UNE INTELLIGENCE SUPÉRIEURE GÉNÉRALE

de proposer des agents à ses clients. Mais comme les modèles qui raisonnent sont plus lents, il faut aussi savoir doser l'équilibre entre coût de calcul et temps de réponse.

L'un des objectifs serait par exemple d'écrire des programmes complexes, et pas seulement de corriger et de suggérer des bouts de code. « Ce serait comme parler à une équipe d'ingénieurs. Chacun devrait ensuite faire la partie du projet qui le concerne », note Laurent Daudet. Certains envisagent même que des agents intelligents se mettent à écrire leur propre programme d'intelligence artificielle, et ainsi accélèrent la fabrication d'une intelligence supérieure générale.

Une équipe de Stanford a appliqué ce principe à la recherche scientifique, en mettant en ligne en novembre 2024, un article, non révisé par les pairs, décrivant les premiers essais de son Virtual Lab. Un agent « chef de labo » a fait travailler ensemble un agent « informaticien », un agent « chimiste » et un agent « critique », pour trouver des molécules actives contre les variants du virus SARS-CoV-2.

Si les agents sont l'un des futurs possibles de l'intelligence artificielle, ils sont aussi l'une des pièces-clés des scénarios dangereux associés à cette technologie. L'autonomie, la possibilité d'interagir sur le Web, ou avec d'autres machines font craindre des pertes de contrôle aux conséquences négatives. La version finale du rapport sur la sûreté de l'IA, présidé par Yoshua Bengio, publié le 29 janvier, note que les progrès récents, dont GPT-4o et R1, renforcent ces inquiétudes.

Des IA qui voient et entendent

Pour bâtir un agent polyvalent, capable, par exemple, de piloter plusieurs applications pour accomplir une tâche, il faut lui donner la vue. Ce sens est indispensable aux IA pour qu'elles déchiffrent l'interface des logiciels et sites Web

qu'elles manient. Les LLM dotés de la vision, voire de l'ouïe, sont dits « multimodaux » (Multimodal Large Language Models, MLLM). Apple y travaille avec son modèle Ferret-UI, Google avec ScreenAI : deux MLLM spécifiquement optimisés pour comprendre les interfaces logicielles.

Pour donner la vision aux LLM, beaucoup d'éditeurs se contentent d'y raccorder une IA visuelle, au risque que les deux se comprennent mal. Mais quelques acteurs tentent d'entraîner une seule et même IA, « nativement multimodale », en lui présentant des mots accompagnés d'images voire de sons – une description textuelle d'un chien accompagnée d'une photo et d'un d'aboïement par exemple –, afin qu'ils soient liés de façon étroite dans sa mémoire. Quelques modèles le font de façon convaincante, tels le GPT-4o d'OpenAI ou le Pixtral 12B de Mistral.

Le multimodal rend déjà des services concrets, en enrichissant nos relations aux IA génératives, avec lesquelles on peut désormais communiquer naturellement, en leur demandant d'écouter nos paroles ou de regarder ce que nous voyons, plutôt qu'en regardant exclusivement des questions textuelles.

Sur le plan oral, les meilleurs MLLM sont déjà très convaincants : ils comprennent bien les questions posées à voix haute, certains tolèrent même d'être interrompus pour enrichir ou réorienter la question. Sur le plan visuel en revanche, leurs capacités sont beaucoup moins avancées, qu'il s'agisse d'analyser des graphiques, des tableaux, de proposer un repas à partir d'une photo du contenu du frigo, de résoudre une équation mathématique, d'analyser la vidéo d'un jeu 3D pour proposer des astuces, etc. Dans la plupart des scénarios d'usage, leur taux d'erreur demeure pour l'instant élevé.

Les MLLM peuvent aussi, en sortie, créer des sons et des images à la demande. La génération de photos donne des résultats très convaincants. Les éditeurs peaufinent encore la génération de textes et d'images mélangés, telles les présentations professionnelles. La génération de vidéos, quant à elle, a de gros progrès à faire. Sora, l'outil vidéo d'OpenAI, testé par *Le Monde*, s'est rarement montré capable de produire des plans exploitables – leur continuité narrative médiocre s'ajoutant aux bugs visuels déformant les personnages. Mais sur quelques requêtes spécifiques, comme les vues aériennes de paysages, les résultats sont déjà surprenants.

Côté audio, les tests récents du *Monde* sur l'outil de génération de vidéo Suno v4 (novembre 2024)

L'EXPOSITION

Notre-Dame
par ses pierres

Le Musée de Cluny propose un voyage entre les statues et les fragments sculptés de la cathédrale parisienne

Un peu plus de cinq ans après l'incendie qui la ravagea, Notre-Dame de Paris a rouvert au public. L'information n'a échappé à personne. Début décembre, certains ont même pu se sentir étouffés par l'ampleur des cérémonies. A ceux-là, qui se demandent si un peu plus de modestie n'aurait pas été bienvenue, nous conseillons de se rendre au Musée de Cluny. Jusqu'au 16 mars, l'établissement parisien présente « Faire parler les pierres », une exposition consacrée aux statues du fameux édifice.

Une centaine de « fragments », comme disent pudiquement les muséographes, des sculptures pour l'essentiel, sorties des décombres de l'édifice ou des collections nationales. Mais leur présentation, leur mise en contexte, les rapprochements opérés offrent l'occasion d'un saisissant voyage.

Il y a d'abord la beauté. Difficile de ne pas être saisi par la trentaine de fragments du jubé de la cathédrale, retrouvés par les archéologues sous la croisée du transept. Détruite à la demande de Louis XIII en 1709 afin de se conformer au concile de Trente, cette cloison de séparation entre le chœur et la nef demeurait un mystère. On n'en connaissait même pas de représentation détaillée. Exhumés, nettoyés, restaurés en un temps record, ces fragments frappent par leur puissance et leur délicatesse. Ici un bloc d'angle, avec ses motifs architecturaux, ses décors végétaux. Là, une statue de Moïse portant les Tables de la Loi, magistral, accompagné de celui que l'on suppose être son frère Aaron. Un peu plus loin, sous une vitrine, tout en finesse, des têtes, une main, un pied, des feuilles de vigne, un rongeur, que l'on croirait prêt à bouger.

« Un puzzle qu'il reste à assembler » L'émotion est décuplée par la polychromie retrouvée. Ce bleu, ce vert, ces rouges, le sossol de Notre-Dame les a préservés pendant plus de trois siècles. Et les restauratrices intervenues au lendemain des fouilles conduites par l'Institut national de recherches archéologiques préventives, de février à mai 2022, ont empêché qu'ils partent en poussière.

L'exposition nous invite aussi à un exercice d'intelligence. La trentaine de fragments du jubé choisis ne forme que « quelques pièces d'un gigantesque puzzle qu'il reste à assembler », admet Damien Berné, le conservateur en chef chargé des sculptures au Musée de Cluny, commissaire de l'exposition. Mais ils ont déjà permis de « résoudre plusieurs "cold cases" », poursuit-il. Autrement dit de transformer le regard posé sur certaines pièces iconiques, conservées au Louvre ou ici même.

Ainsi le Louvre a-t-il célébré, depuis des décennies, cette sculpture baptisée « Adam et Eve et la chaudière de l'enfer ». Exhumée par Viollet-le-Duc en 1858, elle semblait offrir une scène cohérente... La découverte d'une nouvelle « chaudière », plus massive, lors des dernières fouilles, a convaincu les archéologues que le couple originel et « sa » marmite provenaient de deux scènes distinctes d'une frise. ■

NATHANIEL HERZBERG

« Faire parler les pierres, sculptures médiévales de Notre-Dame », Musée de Cluny, Paris 5^e, jusqu'au 16 mars.

LIVRAISON

LIVRE
« Plongez dans votre cerveau. L'explorer, c'est l'apprivoiser »

Que se passe-t-il dans notre cerveau quand nous sommes amoureux ? L'IRM fonctionnelle peut-elle différencier un « faux souvenir » d'une tromperie ? Comment l'activité physique agit-elle sur nos neurones ? A ces questions, et bien d'autres, la neuropsychologue Sylvie Chokron (collaboratrice régulière du Monde) apporte des réponses étayées scientifiquement, tout en les rendant accessibles au plus grand nombre. Elle poursuit ainsi son exploration tous azimuts de ce fascinant organe qu'est le cerveau, avec un enthousiasme communicatif.

» De Sylvie Chokron (Presses de la Cité, 224 p., 19,90 €)

DU VOMI FOSSILISÉ

C'est un éclairage particulier sur la chaîne alimentaire au temps des dinosaures. Voici du vomé vieux de 66 millions d'années. Peter Bennis, un chasseur danois de fossiles, a fait cette découverte au pied des falaises crayeuses de Stevns Klint, au sud de Copenhague. Cet ensemble fossilisé, apporté au musée voisin, à Faxe, a été examiné par John Jagt, spécialiste des fossiles du crétacé au Muséum d'histoire naturelle de Maastricht (Pays-Bas). Verdict ? « L'accumulation est constituée d'au moins deux espèces différentes de lys de mer mélangés », indique le communiqué du Musée de Faxe, où le fossile est désormais exposé. Selon le conservateur du musée, c'est un animal, « probablement une sorte de poisson », qui, il y a 66 millions d'années, a mangé ces lys qui poussaient au fond de la mer crayeuse et en a régurgité les parties des tiges portant des plaques calcaires.

(PHOTO: STEN LENNART JAKOBSEN)



DIX MILLE PAS ET PLUS

MAUX DE DOS, LA VIE MODE D'EMPLOI

Par SANDRINE CABUT

Ce n'est pas cette chronique qui va démentir le slogan de l'Assurance-maladie : pour le mal de dos (comme d'ailleurs pour bien d'autres pathologies), « le bon traitement, c'est le mouvement ». Mais peut-être faut-il aller encore plus loin et agir sur d'autres leviers. En matière de santé publique, les enjeux sont considérables. Aiguës, subaiguës ou chroniques, ces douleurs qui touchent plus de 600 millions de personnes dans le monde sont la principale cause d'invalidité, selon l'Organisation mondiale de la santé, qui a édicté des recommandations en 2023.

Une étude australienne, publiée le 10 janvier dans le *Jama Network Open*, suggère qu'un programme global ciblant le mode de vie peut donner un coup de pouce non négligeable aux lombalgies, notamment en termes de niveau d'incapacité et de qualité de vie.

Chris Williams (université de Sydney) et ses collègues ont inclus 346 personnes âgées en moyenne de 50 ans, souffrant de lombalgies chroniques limitant leur activité, et présentant au moins un facteur de risque lié au mode de vie : excès pondéral, faible consommation de fruits et légumes, activité physique insuffisante, tabagisme.

De façon randomisée, la moitié a bénéficié d'une stratégie nommée HeLP (pour *Healthy Lifestyle Program*), comprenant des recommandations, des consultations (kinésithérapie, nutrition...) et un coaching par téléphone. L'autre groupe a reçu seulement des recommandations pour préserver le dos et faire de l'exercice. Au bout de six mois, les participants à HeLP avaient en moyenne 1,3 point de moins sur l'échelle de Roland Morris – un auto-questionnaire de 24 items évaluant l'incapacité fonctionnelle – que ceux du groupe contrôle. L'effet était aussi statistiquement significatif sur le poids (-1,6 kilogramme) et la qualité de vie.

Le corps écosystème

« Notre corps n'est pas une machine, mais plutôt un écosystème où de nombreux facteurs interagissent et déterminent notre fonctionnement et nos sensations », souligne Chris Williams dans un communiqué. Quand une personne souffre d'une lombalgie qui ne s'améliore pas, elle devrait s'attendre à recevoir des soins globaux portant sur toute une série de facteurs de santé, et pas seulement centrés sur ce qui se passe au niveau de sa colonne vertébrale. En pratique, peu de lombalgiques en sont cependant informés, et « trop sont orientés vers une intervention chirurgicale ou se voient prescrire des médicaments qui ne les soulagent

pas et peuvent même aggraver leur état », déplore ce spécialiste en sciences du mouvement.

Pour Francis Berenbaum, chef du service de rhumatologie de l'hôpital Saint-Antoine (AP-HP), « ces résultats sont relativement modestes, ce qui peut s'expliquer en partie par des problèmes d'observance d'un tel programme, exigeant et impliquant plusieurs professionnels ». Trente des 172 participants traités par HeLP avaient en effet abandonné en cours de route, cinq de plus que dans l'autre groupe.

Cette prise en charge devrait être proposée surtout aux patients les plus motivés, et les plus gênés dans leur vie quotidienne, l'observance étant l'obstacle majeur, relève le professeur Berenbaum. Sans aller jusqu'à un programme aussi complet, des conseils d'hygiène de vie ont sans doute un intérêt. « Il y a un travail d'information à faire sur les liens entre excès de poids et lombalgies. Les médecins connaissent bien les conséquences du surpoids sur les genoux, moins celles sur les lombaires, pourtant scientifiquement établies », poursuit le rhumatologue. Quant au tabac, c'est un facteur de risque moins clair, mais il y a des arguments. »

L'activité physique reste en tout cas au cœur de la prise en charge des lombalgies, qui doit être personnalisée, insiste-t-il. L'application gratuite de l'Assurance-maladie, Activ'Dos, propose de nombreux exercices. Et la marche, rien qu'elle, est déjà efficace. ■

L'ÉNIGME MATHS – N°44

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

UN NOUVEAU JEU

Pour résoudre l'énigme de la semaine dernière, la table était recouverte de brouillons griffonnés et de petits carrés noirs et blancs découpés puis recollés quand nous criâmes enfin victorieux : nous tenions notre échiquier parfait ! Sur cet échiquier (voir figure), la répartition des cases nous apparaissait enfin parfaitement

régulière. Maintenant que nous avions le plateau, il ne nous restait plus qu'à inventer le jeu. Après quelques essais, nous parvîmes à la règle suivante. Le jeu se joue à deux. L'un des joueurs a les pions noirs et l'autre les blancs, et, chacun leur tour, déplacent l'un de leurs pions. Le déplacement d'un pion se fait en suivant un chemin qui, partant de la case

où il se trouve, est soit composé de cases toutes de la même couleur, soit de cases noires et blanches alternées. Un chemin ne peut suivre que des cases se touchant par un côté, sans mouvements en diagonale. Du moment qu'il suit un tel chemin, un pion peut être déplacé d'autant de cases que souhaité. La figure A montre certains

coups possibles. Les pions ne peuvent pas sauter les uns par-dessus les autres, mais si l'un d'eux termine son chemin sur une case occupée par un pion adverse, il capture ce dernier : la figure montre que le pion sur la case A4 peut capturer le pion D2 (et vice versa) et que le pion C6 peut prendre le pion F3 (et vice versa). Le premier joueur qui parvient à capturer tous les pions de son adversaire remporte la partie.

A la fin d'une de nos parties, nous nous retrouvâmes dans la position illustrée par la figure B. C'était alors au tour des noirs de jouer. ► Sauriez-vous découvrir de quelle façon ils s'y sont pris pour capturer à coup sûr le dernier pion blanc ?

INDICE

.cnalb noip reined ud euqat-ta'd etsop nob nu eutitsnoc iuq énrétra nimehc nu emrof 1C-4C-4A-1A érrac eL

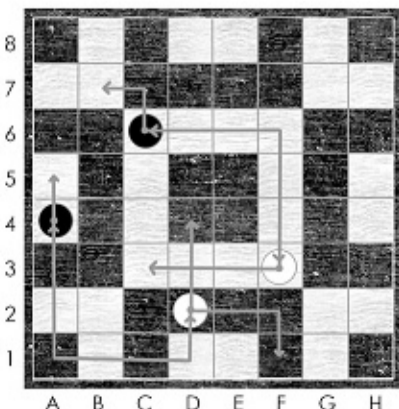


Figure A - Les déplacements

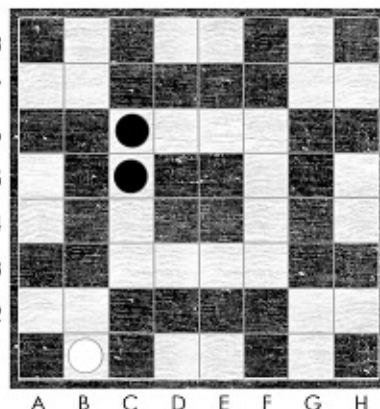


Figure B - Les noirs jouent et gagnent

SOLUTION DE L'ÉNIGME N° 43

Puisque le plateau doit être symétrique, les quatre cases centrales doivent être de la même couleur. Supposons qu'elles soient noires, alors chacune d'entre elles a déjà deux voisines noires, toutes leurs autres voisines (les cases C4, C5, D6, E6, F5, F4, E3 et D3) sont donc nécessairement blanches. Les cases C6, F6, F3 et C3 ont alors deux voisines blanches, leurs autres voisines sont donc noires.

En poursuivant ces raisonnements de proche en proche, en exploitant le fait que chaque ligne, chaque colonne et chaque diagonale comptent quatre noires et quatre blanches, on en déduit les couleurs de toutes les autres cases. Si les quatre cases centrales avaient été blanches, on aurait obtenu la même répartition des cases avec les couleurs inversées.

CARTE
BLANCHEDire et faire dire
les camps
de concentration

Par ANNE BORY

La récente commémoration de la découverte du camp d'Auschwitz il y a quatre-vingts ans a été l'occasion de revenir, dans des entretiens avec des historiens et historiennes, sur l'histoire des camps de concentration nazis, de leur découverte par les troupes soviétiques et de la lente et irrégulière publicisation dont ils ont fait l'objet. Ont aussi resurgi les récits des survivantes et survivants des camps, qui s'éteignent les uns après les autres. Ces récits individuels, pris séparément et ensemble, constituent les piliers d'une mémoire à la fois collective et conflictuelle. Mais ils ne sont pas seulement des objets historiques.

Michael Pollak s'y est penché en sociologue, pour s'interroger sur « *le maintien de l'identité sociale* » dans ce qu'il désigne comme « *une expérience extrême* ». L'ouvrage, intitulé *L'Expérience concentrationnaire* (éditions Métailié, 1990), et devenu un classique des sciences sociales, ouvre un espace pour l'analyse des dynamiques collectives qui sous-tendent ces histoires de vie individuelles.

Michael Pollak souligne à quel point le silence apparent de certaines – il a effectué des entretiens de plus de trente heures chacun avec trois survivantes du camp d'Auschwitz-Birkenau – ne saurait être réduit à un simple oubli. Ce silence, qu'il qualifie de « *gestion de l'indiscible* » (c'est le titre d'un article publié en 1986 dans les *Actes de la recherche en sciences sociales*), révèle des tensions sociales profondes : celles liées à la difficulté de transmettre des expériences qui défient les cadres ordinaires de compréhension, mais aussi à la peur du jugement ou de l'incompréhension.

Transmission et oubli

Le récit de Ruth A., qui se souvient et raconte son expérience des persécutions et des camps en même temps qu'elle se demande ce qu'elle « *aurait pu faire ou penser* », montre ainsi comment les identités « juive » et « allemande », vécues et assignées, se contredisent, se confortent et se combattent. Cette difficile articulation intime, à la fois nécessaire et encombrante, l'a incitée, après la guerre, au silence. Comment expliquer l'adaptation à la vie du camp, l'équilibre entre l'obéissance et la résistance, l'amitié, les sauvetages des uns impliquant l'abandon d'autres, le refus de l'émigration ? Il a mieux valu taire ce que l'on n'est pas sûre de pouvoir ou savoir expliquer, et se concentrer sur ce qui a constitué le moteur de la survie, à savoir la vie elle-même, les interactions sociales, le refus de la déshumanisation.

L'approche sociologique met également en lumière les cadres collectifs dans lesquels s'inscrivent ces expériences. La vie dans les camps de concentration était marquée par des formes d'organisation sociale imposées, souvent perverses, où des relations de pouvoir entre déportées et SS et entre déportées elles-mêmes reflétaient autant des stratégies de survie que des compromis douloureux.

En réinscrivant les récits des déportées dans leurs contextes sociaux et politiques, la sociologie évite une essentialisation de l'expérience individuelle et met en évidence les conditions de possibilité de ces récits. Ceux-ci, lorsqu'ils émergent, ne sont pas simplement des témoignages personnels : ils sont modelés par les attentes sociales, les normes culturelles et les rapports de pouvoir dans lesquels s'insèrent les survivantes. Cette démarche est une réflexion sur les processus sociaux de transmission et d'oubli. Elle contribue à comprendre pourquoi certaines voix sont entendues, tandis que d'autres restent marginalisées, voire effacées.

A l'heure où le salut nazi resurgit sur des scènes officielles, et où l'antisémitisme est revenu au cœur du débat public, l'étude sociologique des récits des déportées constitue un outil crucial pour démonter les mécanismes sociaux qui alimentent la haine et le déni. Retracer la complexité des vécus et des structures sociales qui entourent ces récits rappelle que le travail de mémoire, loin d'être une simple commémoration, est un processus dynamique, ancré dans le présent. ■

Anne Bory
Sociologue à l'université de Lille
anne.bory@univ-lille.fr

Faisons de la greffe rénale à partir
de donneur vivant une priorité absolue

TRIBUNE - Des dirigeants de la Société francophone de transplantation déplorent que la France, pionnière de cette spécialité dans les années 1950, soit reléguée en milieu de peloton européen

À u milieu du XX^e siècle, la France a ouvert la voie et donné l'impulsion à la greffe rénale et, en particulier, à partir de donneur vivant. Au début des années 2000, l'élan semble s'être ralenti et l'esprit d'innovation, le courage et l'audace des pionniers de la transplantation rénale achoppent sur des gouvernances hospitalières qui ont de plus en plus de difficulté à prioriser les activités liées à la greffe.

La greffe rénale avec donneur vivant n'apparaît plus comme un moteur du progrès pour nos patients. Notre pays est aujourd'hui en effet relégué au milieu du peloton européen, derrière les Pays-Bas, la Suisse, le Royaume-Uni et la Suède. Au Royaume-Uni, par exemple, on en réalise quasiment deux fois plus qu'en France, pour le même nombre d'habitants ; une contre-performance qui interroge. Les besoins n'ont pas changé, bien au contraire : chaque jour, en France, deux à trois personnes inscrites sur la liste nationale d'attente décèdent faute de greffons. La greffe rénale, qui représente 62 % de l'ensemble des transplantations réalisées dans les CHU de notre pays, est la plus pénalisée par la pénurie de greffons.

Ces chiffres augmentent très vite car près d'un Français sur dix est concerné par une maladie rénale et le nombre de patients touchés par une insuffisance rénale chronique terminale (IRCT) progresse lui aussi. D'après l'Agence de la biomédecine, en 2022, 10 975 nouveaux patients ont été traités pour cette pathologie. L'IRCT, qui sera la 4^e cause de décès dans le monde en 2040, est un véritable enjeu de santé publique.

A cela s'ajoutent deux fardeaux : la dialyse, qui s'inscrit comme une solution incontournable pour préserver la vie des patients en attente de greffe, est contraignante et impacte sévèrement leur qualité de vie. Elle est aussi un gouffre économique, avec un coût en augmentation constante (plus de 3 milliards d'euros par an pour l'Assurance-maladie selon la commission des affaires sociales du Sénat, en mars 2020). Ces deux éléments justifient que, dans la plupart des cas, la dialyse ne soit qu'une solution temporaire, et que la greffe rénale reste le meilleur des traitements médicaux de l'IRC [*insuffisance rénale chronique*] pour les patients éligibles.

La pénurie de greffons n'est pas un problème insurmontable, et une solution bien connue, maîtrisée par les équipes de greffe et promue par tous les plans ministériels depuis plus de vingt ans, serait de dynamiser l'activité de transplantation rénale à partir de donneur vivant. Cette option, mise au point dans notre pays en 1952 par les professeurs Jean Hamburger et René Küss, est plus économique que la dialyse et n'a que des avantages.

La greffe rénale avec donneur vivant peut être planifiée sans perturber les programmes de blocs opératoires. Elle fonctionne mieux et plus longtemps que celle réalisée à partir d'un donneur décédé, et peut offrir une meilleure compatibilité. Elle peut aussi être réalisée avant que le patient n'entre en dialyse, évitant ainsi la dégradation de la qualité de vie tout en permettant de mieux préserver le capital vasculaire et cardiaque. Le coût annuel moyen

LA FRANCE EST EN RETARD, AVEC SEULEMENT 19 DONS CROISÉS RÉALISÉS AU COURS DES DIX DERNIÈRES ANNÉES. LE ROYAUME-UNI EN FAIT PLUS DE 100 PAR AN !

d'une telle greffe est 4,5 fois moins élevé que celui d'une dialyse. Du côté du donneur, il est démontré que le don, lorsqu'il répond à des critères de sélection précis, n'influe ni sur son espérance de vie ni sur son mode de vie.

Aujourd'hui, la greffe avec donneur vivant dans le cadre d'un don croisé devrait aussi permettre d'améliorer les résultats et de faire encore mieux lorsque la compatibilité entre donneur et receveur n'est pas optimale. Les dons croisés permettent en effet d'échanger les greffons rénaux entre plusieurs paires de donneurs et de receveurs pour optimiser la compatibilité. Là encore, la France est en retard, avec seulement 19 dons croisés réalisés au cours des dix dernières années, quand le Royaume-Uni en fait plus de 100 par an !

La réalisation de ces greffes avec donneur vivant nécessite plus d'organisation, d'arbitrages dans les programmes opératoires, de priorisation des bilans prégreffe et de programmation du suivi des donneurs. Il faut nécessai-

rement des arbitrages courageux par les directions hospitalières et leur tutelle pour y parvenir et il est plus que temps d'agir si nous voulons atteindre les objectifs du plan Greffe 2022-2026.

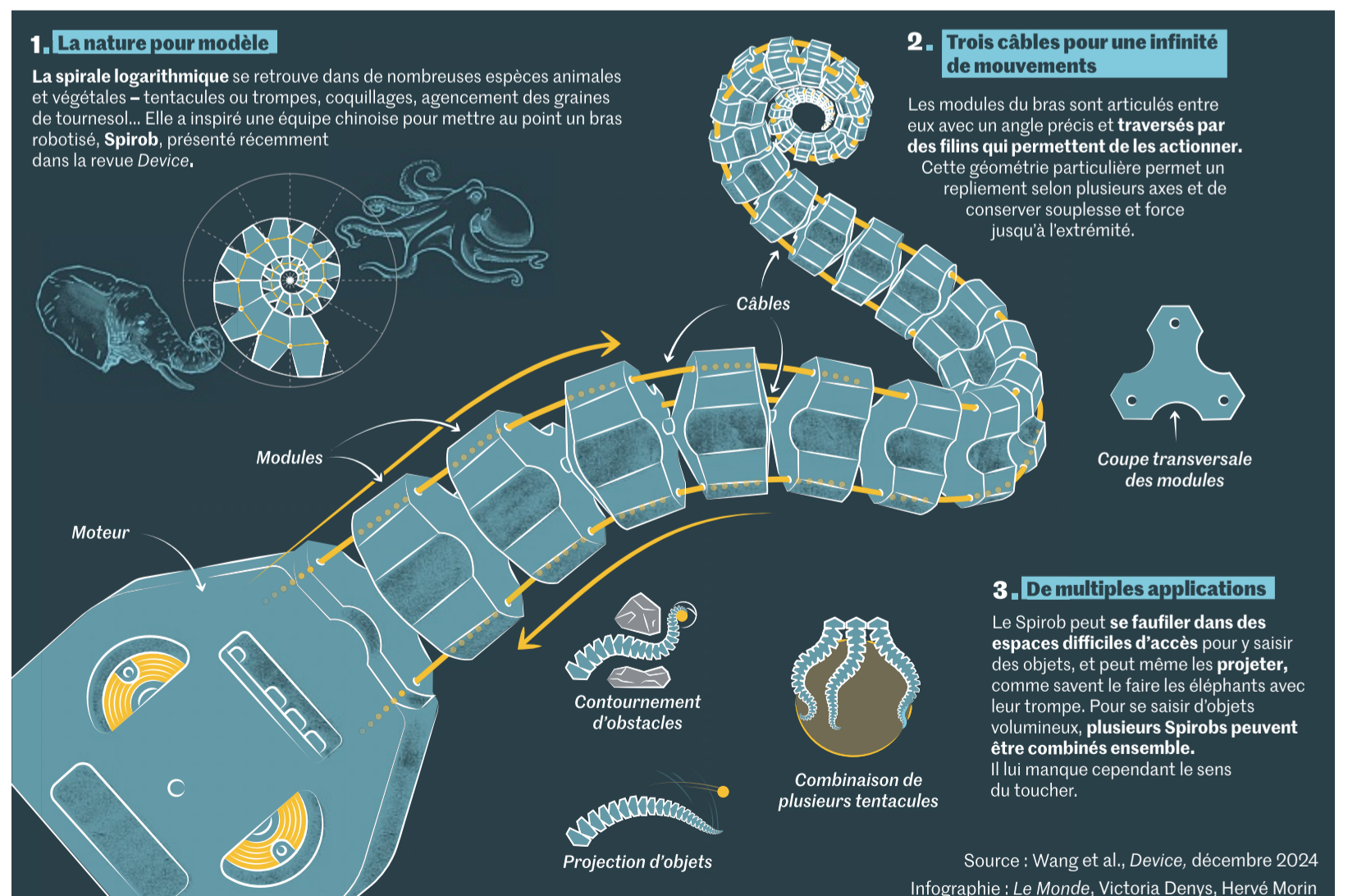
Madame la ministre du travail, de la santé, des solidarités et des familles, Monsieur le ministre chargé de la santé et de l'accès aux soins, Mesdames et Messieurs les directrices et directeurs des agences régionales de santé et d'établissements hospitalo-universitaires et présidentes et présidents de commissions médicales d'établissement, agissons dès aujourd'hui la volonté politique de faire de la greffe rénale à partir de donneur vivant une priorité absolue dans nos hôpitaux, dans nos blocs opératoires et dans les parcours de soins.

Nous, néphrologues, médecins de transplantation, et tous les acteurs de première ligne ne voulons plus être prisonniers d'une absence de décision qui entrave notre capacité de réaliser une médecine d'excellence au service des patients. La greffe rénale à partir de donneur vivant est une solution d'avenir pour traiter l'IRCT et nous devons collectivement réussir à la déployer dans notre pays et dans nos hôpitaux comme beaucoup d'autres pays européens ont réussi à le faire. ■

¶ **Professeur Lionel Badet**, président sortant de la Société francophone de transplantation (SFT) ; **professeur Nassim Kamar**, vice-président de la SFT ; **professeur Antoine Thierry**, président de la SFT

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

SPIROBS, UN BRAS BIO INSPIRÉ, TRÈS ADROIT ET TRÈS PUISSANT



Qu'ont en commun la trompe de l'éléphant, la queue du caméléon et le tentacule de la pieuvre ? Un enroulement suivant la forme d'une spirale logarithmique. Cette géométrie a inspiré une équipe de l'université des sciences et

technologies de Chine à Hefei, qui propose dans la revue *Device* du 6 décembre 2024 une nouvelle classe de bras robotisés, baptisés Spirobs. Ils sont conçus pour combiner une force de préhension élevée et une capacité de

repliement autour des objets à des fins de préhension, comme le fait la pieuvre. La commande est assurée par de simples câbles. La taille des objets saisis peut varier d'un facteur de plus de 1 à 100 et le bras supporter jusqu'à 260 fois

son poids. L'équipe de Xi Wei prévoit de développer les modèles de commande et les systèmes de détection des obstacles pour améliorer ses capacités de préhension fine. ■

HERVÉ MORIN

« Les forages océaniques ont fait apparaître de nouvelles disciplines scientifiques »

ENTRETIEN - Gilbert Camoin, le responsable du Consortium européen pour les forages océaniques scientifiques, nous en explique les enjeux et la nouvelle donne géopolitique

Gilbert Camoin est directeur de recherche CNRS au Centre de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege). Géologue spécialiste des coraux, il anime depuis treize ans l'agence du Consortium européen pour les forages océaniques scientifiques, qui participe aux grands projets internationaux.

Le 1^{er} janvier, l'Europe et le Japon ont lancé un programme international de forage océanique. Quel en est l'objectif ?

Préciser l'histoire et la structure de la Terre. Les roches volcaniques les plus anciennes des bassins océaniques sont des basaltes formés au niveau des dorsales, il y a environ 200 millions d'années, au moment de la dislocation du supercontinent Gondwana... La couche de sédiments, épaisse par endroits de plusieurs kilomètres, dont elles se sont peu à peu recouvertes est principalement constituée de microfossiles de plancton – foraminifères, diatomées... –, qui ont enregistré une multitude d'informations sur les changements océanographiques ayant accompagné les variations climatiques survenues depuis cette époque. En outre, ces fonds ont conservé la trace des éruptions volcaniques, des séismes et des tsunamis passés. Ils dissimulent, parfois à des milliers de mètres sous le plancher océanique – notamment à proximité des sources hydrothermales –, des communautés de micro-organismes dont on ne sait pas grand-chose, sinon qu'ils pourraient jouer un rôle important dans les grands cycles biogéochimiques à l'échelle du globe.

Forer, à l'écart des gisements d'hydrocarbures, les roches et les sédiments sur 2 000 mètres, à des profondeurs d'eau de 1 500, 2 000 ou même 7 000 mètres, en vue d'extraire des carottes d'échantillons ou d'installer des instruments de mesure, est une opération lourde et complexe. Cela nécessite des moyens techniques et financiers bien supérieurs à ceux qu'un Etat est prêt à consacrer aux géosciences. C'est pourquoi, depuis les années 1960, ce type d'expédition à vocation strictement scientifique a uniquement été organisé dans le cadre de programmes internationaux. Le programme international de forage océanique, baptisé « IODP », lancé par les Européens et le Japon est le dernier à voir le jour.

Quelles sont les grandes découvertes associées à ces forages ?

Le tout premier forage scientifique date de 1961. Sur l'initiative d'universités américaines, un projet Mohole est lancé en vue d'atteindre la « discontinuité de Mohorovicic », la zone de transition entre la croûte et le manteau terrestres, située à 5 ou 10 kilomètres sous le plancher océanique. Il n'y parviendra pas... et on n'y est toujours pas arrivé. Mais cette tentative donnera l'impulsion nécessaire à la mise en place de programmes internationaux.

Les deux premiers – le Deep Sea Drilling Project [1966-1983] et l'Ocean Drilling Program [1983-2003] – ne disposent que des navires de forage exploités par les Etats-Unis. Ils n'en sont pas moins des succès. Plus de 200 expéditions sont organisées, donnant lieu à plus de 3 000 forages. De nouvelles disciplines comme la paléocéanographie ou la géomicrobiologie apparaissent, et les géosciences font de belles découvertes. La mise en évidence de l'expansion des fonds océaniques, l'une des preuves de la dérive des continents, date de cette époque. Tout comme la confirmation des « cycles de Milankovitch », qui décrivent comment les variations de l'orbite terrestre gouvernent le climat de notre planète.

L'International Ocean Discovery Program [IODP, 2003-2024] permet d'élargir les moyens au-delà du seul navire américain de forage en haute mer, le *JoIDES-Resolution*. Le Japon lance le sien, le *Chikyu* [2005], et apparaissent d'autres plateformes exploitées par les Européens. Les 14 pays européens, dont la France, réunis, avec le Canada, au sein du Consortium européen pour les forages océaniques [Ecord], ne possèdent pas d'équipements, mais louent les systèmes de forage et les bâtiments nécessaires aux missions qu'ils organisent. Ce qui leur permet de réaliser des campagnes à des endroits inaccessibles aux vaisseaux du programme : par exemple, sous la banquise dans l'océan Arctique, en 2004, ou à de faibles profondeurs sur les barrières de corail de Tahiti et d'Australie, en 2005 et



Gilbert Camoin, en Polynésie française, le 1^{er} septembre 2015. CLAUDE VELLA

en 2010. Une centaine d'expéditions vont être organisées dans le cadre de l'IODP.

La longueur totale des carottes d'échantillons conservées dans les carothèques d'Allemagne, des Etats-Unis et du Japon dépasse 500 kilomètres. L'expédition la plus spectaculaire de toutes au plan technologique sera sans doute celle entreprise en 2012, au large du Japon, sur la faille responsable du tsunami, à l'origine de la catastrophe de Fukushima, en 2011. Le *Chikyu* a creusé le plateau océanique sur 854 mètres par 6 900 mètres de fond pour installer des instruments scientifiques. Un exploit qu'il a répété au mois de décembre 2024, lors de l'ultime campagne de l'IODP.

Après avoir joué un rôle leader dans le domaine des forages océaniques pendant plus de six décennies, les Etats-Unis ont annoncé ne plus vouloir participer à des programmes internationaux de type IODP, qui s'est achevé en décembre. Comment l'expliquer ?

Il faut savoir que les coûts opérationnels des navires de forage ont connu une forte hausse. Le budget de fonctionnement du *JoIDES-Resolution* tournait autour de 65 millions de dollars [62 millions d'euros] par an, dont 48 étaient payés par la National Science Foundation américaine et le reste par les Européens d'Ecord, la Chine, l'Inde, l'Australie, la Nouvelle-Zélande. Pour continuer, il aurait fallu porter cette somme à 80 millions de dollars. Ce qui était inenvisageable, sous peine de remettre en cause les autres activités. Le désarmement du *JoIDES-Resolution* constitue un préjudice.

Aujourd'hui, le *Chikyu*, de l'Agence japonaise des sciences et technologies de la Terre et de la mer, est un monstre de technologie : il jauge 57 000 tonnes, mesure 210 mètres de long, peut embarquer 150 personnes à bord et est équipé d'un derrick de 121 mètres et de 10 kilomètres de tiges de forage qui lui permettent de creuser le plancher océanique très loin sous la surface de l'eau. Mais ses coûts de maintenance sont colossaux : de l'ordre de 50 millions d'euros par an. C'est pourquoi il doit être loué une partie du temps à des entreprises privées.

Personne ne peut prétendre avoir été surpris par le départ des Américains, qui réclamaient depuis longtemps une répartition plus équitable des contributions. Dès la première présidence de Donald Trump [2017-2021], ils avaient annoncé leur intention de fonder un programme purement américain. Ce dernier est en cours de négociation et pourrait démarrer en 2026, en même temps que celui de la Chine.

Que sait-on de ce programme national chinois ?

Il y a quelques années, la Chine avait exprimé son désir de devenir le quatrième opérateur de moyens de forage de l'IODP après les Etats-Unis, le Japon et les Européens. Son deuxième navire, le *D/V-Meng-Xyang*, lancé en novembre 2024, serait capable de creuser le plancher océanique au-delà de 11 000 mètres de profondeur. Une partie de ses activités de forage scientifique sera réservée au programme national chinois sur le climat, la structure de l'écorce terrestre ou la biosphère. Une trentaine d'expéditions sont prévues en dix ans dans le Pacifique et l'océan Indien. Il est question d'aller forer au fond de la fosse des Mariannes, et même de percer la croûte terrestre jusqu'au manteau supérieur pour atteindre cette fameuse « discontinuité de Mohorovicic » qui constituait l'objectif du projet américain Mohole de 1961.

Quelle place l'IODP va-t-il occuper dans ce paysage ?

Ce programme a été créé en vue de mettre au service de la communauté scientifique les moyens du Japon et des Européens d'Ecord. C'est-à-dire le *Chikyu*, un second vaisseau de recherche japonais, le *Kaimei*, et des plateformes et des navires loués au cas par cas. Le budget de l'IODP, limité à une vingtaine de millions de dollars, augmentera quand d'autres pays l'auront rejoint. L'Australie, l'Inde et la Nouvelle-Zélande se sont déclarées intéressées, et la première dit être prête à fournir des équipements, comme des brise-glaces.

Et puis, la création des programmes nationaux américains et chinois n'exclut pas la possibilité de s'accorder sur des projets communs. Sur les trois expéditions de l'IODP prévues en 2025, l'une, qui se consacra à l'étude des réserves d'eau douce disponibles au large de la Nouvelle-Angleterre, va d'ailleurs se dérouler avec une participation financière et scientifique des Etats-Unis. Preuve que les portes restent ouvertes. Quant à la Chine, sa collaboration avec l'IODP n'est pas exclue.

Alors, certes, le mode d'organisation des expéditions de forages océaniques qui prévalait depuis soixante ans est en train de changer, mais l'activité perdurera, car elle répond à un besoin. Qui pourrait prétendre que l'étude des changements océanographiques et climatiques, la prévoyance des risques d'éruptions, de séismes et de tsunamis ou l'évaluation des ressources de la planète ne constituent pas des thèmes de recherche porteurs d'avenir ? ■

VAHÉ TER MINASSIAN



ZOOLOGIE

L'astuce du crotale pour stocker la pluie

En trente ans d'étude des serpents, Scott Boback croyait avoir appris à bien les connaître. A évacuer les clichés qui, depuis une sale histoire de pomme, en font des créatures dangereuses, surnoises, brutales. A se laisser surprendre par leur finesse et la variété de leurs ressources. Mais quand il a découvert les photos prises sur la « butte des crotales », le professeur de biologie du Dickinson College, en Pennsylvanie, reconnaît avoir eu du mal à y croire.

Lui et sa collègue Emily Taylor, de l'université d'Etat polytechnique de Californie, avaient équipé ce site particulièrement aride du Colorado d'appareils photo à déclenchement automatique. Et là, en observant les clichés nocturnes, il est resté en arrêt. « Une petite pluie venait de commencer à tomber, ce qui est exceptionnel car, en dehors de la neige en hiver, on enregistre ici moins de 5 millimètres d'eau par an. On voyait les serpents sortir de leur grotte, prendre des positions inconnues et apparemment boire sur leur propre corps. Je les ai montrés à Emily, elle s'est mise à crier. On était comme deux gosses. On a évidemment décidé d'aller plus loin. » Les résultats de la recherche qui s'est ensuivie ont été publiés le 11 novembre 2024 dans la revue *Current Zoology*. Ils sont spectaculaires, comme les photos et vidéos rendues publiques par les chercheurs.

L'expérience mise en place au début de l'été 2021 est particulièrement simple. Avec, pour tout matériel de précision, une pompe à eau et un arrosoir de pelouse. Dissimulés derrière un buisson, les chercheurs activent le pulvérisateur en direction – mais à distance – des crotales des prairies (*Crotalus viridis*). Les serpents agitent d'abord leur langue de façon accélérée, pour mieux sentir l'atmosphère. Puis ils s'approchent. Et enfin prennent position sous les gouttelettes. « Une séquence presque systématique commence », insiste le chercheur. Ils s'enroulent soigneusement, en partant de la queue, accolent chaque boucle à la précédente, pour minimiser la surface perdue. Forment une sorte de crêpe.

Plus étonnant encore, ils inversent alors la courbure de leur corps. Non plus des boudins, mais des canaux, au fond desquels l'eau peut s'accumuler. « Des tasses de thé », image



Un nid de crotales dans le Colorado.

SCOTT BOBACK/DICKINSON COLLEGE

Scott Boback. Les crotales approchent leur bouche de la rigole ainsi constituée et boivent. « Ils continuent tant qu'il y a de l'eau et même quand on arrête d'arroser », poursuit le biologiste. Une fois rassasiés, ils cessent tout mouvement, figés dans ce qu'Emily Taylor s'est amusée à appeler un « coma éthylique ». Sans alcool, évidemment.

Les chercheurs entendent désormais poursuivre leurs investigations. Ils rêvent de mesurer la quantité d'eau ainsi absorbée et l'évolution des paramètres biologiques du reptile. Vérifier aussi si l'organisation des écailles sur sa tête ne guiderait pas par elle-même l'eau vers la bouche, sans le moindre effort cette fois, une caractéristique observée chez certains lézards. « Certaines images nous laissent supposer, mais tout reste à prouver », dit Scott Boback. Enfin, ils espèrent voir d'autres équipes mettre en place des protocoles similaires sur d'autres espèces. « Je connais peu d'expériences aussi bon marché », plaide-t-il.

De quoi tenter d'élargir le club des admirateurs des serpents, auquel Xavier Bonnet, directeur de recherche (CNRS) au Centre d'études biologiques de Chizé (Deux-Sèvres), appartient lui aussi depuis longtemps. « Cette étude originale vient nous rappeler à quel point ces animaux sont doux, délicats, inventifs », souligne-t-il. Peut-être même altruistes. Parmi les comportements observés, les chercheurs ont vu à plusieurs reprises un crotale s'abreuver sur un autre, sans que ce dernier n'y trouve quoi que ce soit à redire. Le serpent, animal social ? Toute une histoire à réécrire. ■

NATHANIEL HERZBERG