



Quand l'IA fait parler le cerveau

LA
CHRONIQUE
de Alexandre
Mignon



Pas un jour sans que l'intelligence artificielle n'apporte de nouvelles perspectives en santé, notamment dans l'exploration des fonctions cérébrales. Certaines personnes perdent l'usage de la parole, par exemple lors d'un accident vasculaire, soit par une atteinte directe des zones corticales responsables de l'élaboration du langage (aphasie), soit par une atteinte des zones responsables de l'élocution (anarthrie). Dans cette dernière situation, les zones du langage conservent une activité qui ne se traduit pas en sons compréhensibles, mais qu'on peut enregistrer sous forme de potentiels électriques. C'est ce qu'une équipe de chercheurs américains (financée entre autres par Facebook) a fait en posant sous le crâne d'un patient paralysé depuis seize ans une plaque de 128 électrodes de deux millimètres de diamètre espacées tous les quatre millimètres en regard des zones d'intérêt, reliées lors des expériences d'apprentissage à un capteur externe. Le patient a lu des mots et des phrases pendant cinquante séances, l'activité électrique spécifique (patterns) enregistrée a été « moulinée » par les techniques de deep learning et les phrases reconstruites par les techniques de traitement du langage naturel. De manière spectaculaire pour un premier essai très préliminaire, ces mots et phrases ont été ensuite reconnus lors des périodes de tests au rythme de quinze mots par minute, sans erreurs pour trois mots sur quatre et une phrase sur deux, en temps réel. Ces résultats sont enthousiasmants, car en affinant les outils d'interface entre neurones et ordinateur, en enregistrant des zones de plus en plus petites, et idéalement sans avoir besoin d'ouvrir la boîte crânienne, il est possible d'espérer accroître encore les performances des algorithmes pour améliorer la vie de centaines de gens handicapés, mais aussi et surtout pour mieux comprendre nos fonctions supérieures, qu'elles concernent le langage, la vision ou la conscience. Un pas de plus vers l'homme augmenté, pas dont il faudra toutefois mesurer les bénéfices comme les risques...

Alexandre Mignon est professeur d'anesthésie-réanimation à l'hôpital Bichat



LA PUBLICATION

Aux origines de la pensée symbolique

Le plus ancien comportement symbolique humain connu vient d'être mis à jour dans la grotte de Bizmoune, à Essaouira (Maroc). Comme expliqué dans l'étude parue dans « Science Advances », il s'agit d'un ensemble de 32 coquilles d'un gastéropode marin qui ont été façonnées, voire colorées avec de l'ocre rouge, probablement pour être utilisées en pendentifs. Or, ces coquilles ont été retrouvées dans une couche stratigraphique datant de 142.000 à 150.000 ans, alors que, jusqu'ici, les plus anciennes traces d'un comportement symbolique chez notre espèce, Homo sapiens, découvertes dans des sites du Levant, dataient d'environ 135.000 ans. Cette découverte est à rapprocher d'une autre, relatée dans la revue de l'Académie des sciences. Elle explique qu'une équipe a récemment exhumé, dans une grotte des Pyrénées-Orientales appelée « la caune de l'Arago », des traces de feu domestique vieilles de 560.000 ans. Ce qui, là encore, amène les paléanthropologues à revoir leur chronologie : jusqu'à présent, les premières traces de la domestication du feu en Europe remontaient à 400.000 ans. Qu'il s'agisse de l'espèce sapiens ou de celles qui l'ont précédée, le genre Homo s'est montré décidément plus précoce qu'on ne le croyait ! — Y. V.

INTERVIEW // Serge Haroche, Prix Nobel de physique

« Les horloges optiques nous ouvrent les portes de la nouvelle physique »

Propos recueillis par
Yann Verdo
@verdoyann

C'est la plus richement dotée des récompenses scientifiques : le Breakthrough Prize 2022 et ses 3 millions de dollars sont allés, dans la catégorie physique fondamentale, au Japonais Hidetoshi Katori et au Sino-Américain Jun Ye pour leur horloge à réseau optique, d'une telle précision qu'elle relègue nos meilleures horloges atomiques actuelles au rang de vulgaires pendules. Le Prix Nobel de physique Serge Haroche, auteur de « La Lumière révélée » (Odile Jacob, 2020), nous explique pourquoi cette mesure ultraprécise du temps est si cruciale en science.

On dit que l'horloge à réseau optique de Hidetoshi Katori et Jun Ye est si précise qu'elle se décalerait de moins d'une fraction de seconde en 15 milliards d'années, soit plus que l'âge de l'univers. Est-ce vrai ?

C'est exact. L'incertitude relative de la mesure du temps par cette horloge est de l'ordre de 10^{-19} , soit environ 1/20 de seconde sur l'âge de l'univers ! Pour vous donner une idée de ce qu'une pareille précision représente, cela voudrait dire, en transposant la mesure du temps à celle de l'espace, que l'on pourrait mesurer la distance de la Terre à la Lune avec une marge d'erreur ne dépassant pas la moitié de la taille d'un atome ! Une telle horloge est sensible à une infime courbure de l'espace-temps. La théorie de la relativité générale nous dit que la gravité influe sur l'écoulement du temps et que deux horloges situées à une altitude différente dans le champ de gravitation terrestre battent à des rythmes différents. Il y a une dizaine d'années, grâce à la première génération d'horloges optiques, David Wineland (avec lequel Serge Haroche a partagé le Nobel de physique 2012, NDLR) avait observé ce décalage temporel sur une différence d'altitude de 30 centimètres. Maintenant, avec l'horloge optique de Hidetoshi Katori et Jun Ye, on fait plus de cent fois mieux : on atteint une précision qui rend possible de constater ce décalage sur une différence d'altitude de quelques millimètres.

En quoi le fonctionnement des horloges optiques diffère-t-il de celui des horloges atomiques qui ont précédé ?

Les horloges atomiques commerciales – celles du système GPS par exemple – sont basées sur des atomes de césium ou de rubidium dont les électrons battent la mesure du temps à quelques gigahertz (quelques milliards d'oscillations par seconde). Il s'agit de fréquences relevant du domaine des micro-ondes. C'est sur le fonctionnement de ces horloges qu'est actuellement définie, dans le Système international d'unités (SI), la seconde : elle correspond exactement à 9.192.631.770 périodes d'oscillation d'une horloge à césium. Les horloges optiques fonctionnent selon le même principe, à ceci près qu'elles remplacent les micro-ondes par de la lumière visible, qui oscille environ 100.000 fois plus vite : ces horloges, basées sur des atomes de strontium ou d'ytterbium, battent non plus à quelques gigahertz, mais à plusieurs centaines de térahertz (sachant qu'un térahertz vaut mille gigahertz). Or, il y a une règle constante, qui se vérifie depuis les premières horloges de Huygens au XVII^e siècle : plus l'horloge compte d'oscillations dans une seconde, plus la mesure du temps est précise. Cette loi est encore vraie aujourd'hui : en passant dans les vingt dernières années de l'horloge à césium à l'horloge optique, on a, après de multiples perfectionnements, multiplié la précision de la mesure du temps par un facteur de l'ordre de 100.000.

C'est aussi simple que cela ?...
Pas tout à fait ! Le gros problème, c'est qu'il ne suffit pas de caler l'horloge sur une fré-



Serge Haroche : « En passant dans les vingt dernières années de l'horloge à césium à l'horloge optique, on a multiplié la précision de la mesure du temps par un facteur de l'ordre de 100.000. » Photo Sipa

Avec les horloges optiques, les fameuses « montres molles » de Salvador Dali sensibles à la courbure de l'espace-temps deviennent une réalité tangible !

quence plus rapide. Encore faut-il pouvoir mesurer cette dernière. Pour cela, il faut la ramener à une fréquence plus basse, qu'on soit capable de compter. Ce problème ne se pose pas pour les horloges à césium : on sait fabriquer des systèmes électroniques capables de compter les fréquences micro-ondes. Mais les fréquences optiques sont beaucoup trop rapides. C'est pourquoi les horloges optiques n'ont pu être mises au point qu'après l'invention du « laser peigne de fréquences », un dispositif laser qui divise les fréquences optiques et les ramène à des fréquences mesurables. C'est cette invention qui a valu à John Hall et Theodor Hänsch le prix Nobel de physique 2005. En fait, les horloges optiques, dans lesquelles les oscillations d'atomes de strontium ou d'ytterbium sont mesurées, fonctionnent grâce à l'action conjuguée de quatre lasers : le laser qui fabrique le réseau optique, c'est-à-dire qui crée le champ de force dans lequel sont emprisonnés les atomes ; celui qui refroidit ces atomes à des températures très basses afin de les empêcher de bouger, ce qui brouillerait la mesure ; le troisième, un laser de précision d'une stabilité exceptionnelle, qui interroge la transition atomique ; et enfin le quatrième, le laser peigne de fréquences, sans lequel nous ne pourrions pas compter cette fréquence ultrarapide.

Quelles sont les applications technologiques d'une horloge aussi précise ?

La principale concerne tout ce qui relève de l'exploration du champ gravitationnel terrestre. Le fait que les horloges à réseau optique soient désormais sensibles à d'infimes variations de ce champ a des implications considérables : en géodésie (on « promène » l'horloge au-dessus du sol pour voir comment se répartissent et bougent les masses souterraines) ; en sismologie (le même principe permettrait de prévoir des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques) ; dans les sciences du climat (mesure de la variation du niveau des océans ou de l'épaisseur des calottes glaciaires), etc.

Et sur le plan purement scientifique ?

Sur le plan de la physique fondamentale, on songe bien sûr, en premier lieu, à la théorie de la relativité – restreinte comme générale –, que les horloges optiques vont pouvoir tester avec une précision accrue. Si ces tests révèlent quelque chose d'inattendu, s'ils font état d'un infime désaccord entre ce que prédit la théorie et ce que mesure l'horloge, ce sera le premier indice que nous nous trouvons au seuil d'une nouvelle physique, et ce sera évidemment très excitant. En particulier, et on a déjà commencé d'essayer de répondre à cette question avec les horloges

atomiques à micro-onde, il va s'agir de voir si les constantes fondamentales de la nature sont bien toutes des « constantes » ou si elles ont varié dans le temps. On pense notamment à la constante de structure fine, qui est un nombre sans dimension mesurant la force de l'interaction électromagnétique. On se demande si elle a toujours eu dans le passé la valeur qu'elle a aujourd'hui. Des horloges ultraprécises doivent en principe pouvoir répondre à cette question. Comment ? En comparant le temps qu'indiquent deux horloges fonctionnant avec des types d'atomes différents. On a déjà comparé, sur des durées très longues, les temps indiqués par deux horloges atomiques à micro-onde. Jusqu'à présent, ce test n'a pas permis de mettre en évidence un décalage (ce qui va dans le sens d'une constante de structure fine effectivement constante), mais on va désormais pouvoir l'améliorer avec deux horloges optiques, l'une fonctionnant par exemple avec des atomes de strontium et l'autre avec des atomes d'ytterbium, et voir ce que cela donne.

Il y a d'autres mystères qui pourraient être éclaircis par les horloges optiques. Celui de la matière noire, par exemple. L'une des particules candidates à la matière noire est le dilaton. Cette particule encore hypothétique créerait dans l'espace un champ qui modifierait légèrement la constante de structure fine, et une horloge optique pourrait être sensible à cette minuscule fluctuation de sa valeur. La physique au-delà du modèle standard arrive à une crise qui rend la poursuite de la recherche extrêmement difficile et coûteuse : le LHC, l'accélérateur de particules du CERN, fait 27 kilomètres de circonférence. Pour poursuivre la recherche au-delà du modèle standard, il faudrait sans doute des accélérateurs encore bien plus grands... L'autre voie d'accès à cette nouvelle physique, c'est l'ultraprécision : celle-là même que rend possible une horloge comme celle-ci qui peut venir prendre le relais des accélérateurs de particules et nous ouvrir les portes de la nouvelle physique. Les horloges optiques pourraient également, sinon remplacer les interféromètres géants qui détectent aujourd'hui les ondes gravitationnelles, du moins venir les compléter en étant sensibles à ces ondes dans des gammes différentes de fréquence. Le passage de ces ondes qui modifient la courbure de l'espace-temps pourrait être détecté par ces horloges dans des dispositifs beaucoup plus compacts que les antennes gravitationnelles actuelles... Avec les horloges optiques, les fameuses « montres molles » de Salvador Dali sensibles à la courbure de l'espace-temps deviennent une réalité tangible ! ■



Retrouvez l'intégralité de cette interview sur lesechos.fr