

> génome de la bactérie, ils sont parvenus à encoder une série d'images dans l'ADN et à la restituer. Les chercheurs ont ainsi enregistré un extrait de la première séquence d'animation créée en 1878 par le photographe britannique Eadweard Muybridge, qui met en scène un cheval au galop.

ENREGISTRER EN TEMPS RÉEL L'EXPRESSION DES GÈNES

Plus récemment encore, en 2018, des chercheurs du laboratoire de Randall Platt, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse, ont mené ces approches encore plus loin en ciblant non plus l'ADN, mais l'ARN messager. Cette molécule est un cousin moléculaire clé de l'ADN, intermédiaire indispensable entre les gènes portés par l'ADN et la synthèse des protéines qu'ils codent. Au lieu de stocker des images dans des séquences d'ADN de synthèse, les chercheurs ont utilisé le système CRISPR d'une bactérie pour enregistrer en temps réel les ARN messagers qu'elle produisait, et donc l'expression de ses gènes. L'ensemble de tous les ARN messagers présents dans une cellule à un instant donné permet de savoir quelles protéines sont produites, et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement de la cellule étudiée.

Afin d'enregistrer dans le génome d'une cellule les séquences des ARN messagers qu'elle a produits à divers moments, l'équipe de Randall Platt a tout d'abord testé différentes protéines Cas (associées au système CRISPR) issues de nombreuses souches bactériennes distinctes. Elle a ainsi découvert que les protéines Cas1 et Cas2 de la bactérie *Fusicatenibacter saccharivorans* étaient capables de convertir l'ARN messager en ADN et de l'encoder dans sa bibliothèque CRISPR. Les chercheurs ont utilisé ce procédé afin d'enregistrer le comportement d'une cellule à la suite de différents événements: un stress oxydatif, des conditions acides et l'exposition à un herbicide.

Ces résultats sont particulièrement intéressants: ils fournissent la preuve qu'il est possible d'enregistrer dans le génome d'une cellule, à un instant donné, les gènes qu'elle exprime, en vue d'une analyse ultérieure. Le laboratoire de Randall Platt continue d'améliorer cette technique. L'enregistrement en temps réel de l'expression des gènes pourrait s'étendre à d'autres domaines et permettre, par exemple, de suivre les événements qui rendent cancéreuse une cellule ou encore d'observer comment une cellule répond à une infection au cours du temps.

Alors que l'ADN est utilisé pour produire, suivre et stocker de l'information dans des domaines de plus en plus nombreux, on peut se demander s'il a la capacité de rivaliser avec les dispositifs électroniques usuels de stockage et de prendre en charge l'ensemble des

Conservé au sec et au frais, l'ADN résiste des dizaines de milliers d'années

données générées par les humains. Pour l'instant, la réponse est non: disques durs et cartes mémoires sont bien plus adaptés pour conserver des informations que le plus avancé des systèmes génétiques.

En même temps, comme toute technologie, les appareils électroniques conventionnels ont leurs limites. Ils prennent de la place et nécessitent des conditions environnementales particulières. Et même les dispositifs les plus robustes tiennent rarement plus de quelques décennies. À cause de ces obstacles, il deviendra de plus en plus difficile de conserver toutes les données que nous produisons.

Au contraire, l'ADN résiste des dizaines de milliers d'années s'il est conservé dans des environnements frais et secs. Il est aujourd'hui couramment stocké à -20°C , voire à -80°C dans les laboratoires, mais pourrait aussi être conservé sous des chaleurs extrêmes que les appareils électroniques ne supportent pas. En 2015 en effet, Robert Grass et Wendelin Stark, tous deux à l'École polytechnique fédérale de Zurich, ont montré que des molécules d'ADN encapsulées dans des billes de verre résistaient à une température de 70°C pendant une semaine sans qu'aucune erreur n'apparaisse. Et si les disques durs permettent de stocker 19 gigaoctets par centimètre carré, des estimations récentes suggèrent que l'ensemble des informations générées dans le monde tiendraient, en théorie, dans moins de 1 kilogramme d'ADN.

UNE RECHERCHE À ENCADRER

Il reste du chemin à parcourir avant que le stockage sur ADN devienne courant. Le premier obstacle réside dans l'extraction des informations: si elle est presque instantanée à partir d'un disque dur, récupérer des données encodées dans l'ADN requiert du séquençage, ce qui peut prendre de quelques minutes à une journée entière. Et même si les séquenceurs ont connu des avancées considérables ces dernières années, ils restent imposants et chers par rapport aux disques durs.

BIBLIOGRAPHIE

C. D. Sago et al., **High-throughput in vivo screen of functional mRNA delivery identifies nanoparticles for endothelial cell gene editing**, *PNAS*, vol. 115(42), pp. E9944-E9952, 2018.

F. Schmidt et al., **Transcriptional recording by CRISPR spacer acquisition from RNA**, *Nature*, vol. 562, pp. 380-385, 2018.

S. L. Shipman et al., **CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria**, *Nature*, vol. 547, pp. 345-349, 2017.

G. M. Church et al., **Next-generation digital information storage in DNA**, *Science*, vol. 337, p. 1628, 2012.

Ces limites ne sont pas les seules considérations à prendre en compte. La banalisation du séquençage aura des répercussions sur le quotidien: tracer des personnes deviendra plus facile et de nouvelles vulnérabilités quant à la sécurité des données feront leur apparition. Les exemples d'atteinte à la vie privée sont déjà légion. Aux États-Unis, le séquençage de l'ADN est utilisé par les départements de police avec peu de vigilance. Lorsqu'elle enregistre l'ADN de personnes en état d'arrestation, même pour des crimes mineurs, la police enrichit de vastes banques de données génétiques. Cette procédure est considérée par certains comme l'équivalent moderne des empreintes digitales. Pourtant, il y a une différence majeure: les empreintes digitales n'identifient qu'un seul individu. En revanche, si une personne fournit son ADN, elle fournit une information qui peut permettre d'identifier n'importe quel membre de sa famille. En Chine, sous le couvert d'un programme de santé, des agents ont rassemblé des informations génétiques concernant près de 36 millions de personnes sans que l'on ne connaisse l'usage que le gouvernement en fera. Or cette population compte notamment de nombreux Ouïgours, les membres d'un groupe ethnique musulman victime de discriminations...

Jusqu'à aujourd'hui, les principales préoccupations sur le stockage d'informations génétiques concernaient le patrimoine individuel et la protection de l'identité. Mais dans le futur, si des informations comme des données de santé, des contrats légaux et d'autres histoires individuelles sont stockées dans de l'ADN, cela soulèvera de nombreuses questions en termes de sécurité physique des données et de cybersécurité. Des quantités si importantes d'informations rentreront dans un espace si petit: comment distribuer les données pour éviter qu'elles soient concentrées en un seul endroit? Et même si l'extraction devient plus simple, comment accèdera-t-on puis stockera-t-on à nouveau les données sans les exposer à des piratages malveillants ou à des pertes accidentelles?

L'ampleur du travail scientifique et éthique à accomplir me décourage parfois. Je pense alors aux frères Wright. Leur premier vol a duré 12 secondes, durant lesquelles ils ont parcouru 37 mètres. Soixante-six ans plus tard, les humains ont posé le pied sur la Lune. Ces exploits me laissent espérer que nous saurons exploiter le potentiel de l'ADN au cours des prochaines décennies et mettre tout en œuvre pour que ce potentiel soit mis au service du bien commun. ■

RENCONTRES

Samedi 5 octobre – 15h

PoulpeFiction – Chronique d'une intelligence hors du commun

Dans le cadre de l'exposition *Océan, une plongée insolite* à la Grande Galerie de l'Évolution

Avec : **Laure Bonnaud-Ponticelli**, Biologiste, enseignante-chercheuse, spécialiste des céphalopodes, Muséum et **Aline Richard Zivohlava**, Journaliste scientifique pour le site The Conversation France, auteure de *Dans la peau des bêtes* paru aux éditions Plon (2019).

Dès 8 ans - sur inscription : jardindesplantesdeparis.fr

Rotonde de la Ménagerie

Ménagerie, zoo du Jardin des Plantes - Paris 5°

Lundi 7 octobre – 19h

L'agroécologie en pratique : trajectoires et expériences d'agriculteurs.trices

Modératrice : **Margaux Alarcon**, doctorante, Muséum

Avec : **Marie Françoise Bizard-Pasquet**, agricultrice gérante et membre de l'Académie d'Agriculture, **Kevin Morel**, ingénieur agronome, AgroParisTech Paris, **Véronique Lucas**, sociologue et agroécologue, INRA Montpellier

Lundi 14 octobre – 19h

De l'océan à l'assiette

Modérateur : **Christophe Lavelle**, biophysicien, commissaire de l'exposition *Je mange donc je suis* du Musée de l'Homme

Avec : **Guy Duhamel**, ichtyologue, Muséum, **Laurent Nicolle**, armateur, Groupe Le Garrec, **Elisabeth Vallet**, directrice Éthique Océan, **Julien Dumas**, chef du Lucas Carton, Paris

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution

36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5°

LES { Partagez les savoirs }
RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur jardindesplantesdeparis.fr

POUR LA
SCIENCE

