

Climatologie

Mieux cultiver pour stocker le carbone

Lancée lors de la COP 21, l'initiative « 4 pour 1 000 » (ou « 4 ‰ ») vise à séquestrer dans les sols chaque année une masse de carbone égale à celle que l'humanité émet dans l'atmosphère. Vincent Chaplot, qui s'est chargé du volet sud-africain d'une étude internationale préliminaire, nous explique comment cet objectif pourrait être atteint.

comparer des graphes. Et des algorithmes développés par ailleurs se montraient rapides quelle que soit la complexité des graphes comparés. Ces algorithmes de test d'isomorphisme de graphes sont utilisés par exemple en chimie pour vérifier que des molécules complexes sont les mêmes malgré des conformations différentes.

Les mathématiciens se demandaient donc si le problème était vraiment aussi difficile qu'on le pensait. Le résultat de László Babai confirme cette intuition. Il a développé un algorithme dont le temps de calcul augmenterait de façon « quasi polynomiale » (plus précisément : comme $\exp[(\log n)^a]$, où a est de l'ordre de quelques unités) en fonction de n . L'isomorphisme des graphes se rapproche donc de la classe des problèmes faciles.

La stratégie adoptée dans l'algorithme consiste à chercher des symétries dans les deux graphes à comparer et à les décomposer en éléments plus simples selon une procédure récursive. C'est justement dans cette procédure qu'Harald Helfgott a trouvé une faille. Une étape, la procédure « Split ou Johnson », se montrait problématique. Elle consiste à identifier à l'intérieur des deux graphes comparés un sous-graphe de type particulier, un « graphe de Johnson », ou à colorier les graphes d'une façon qui exhibe leurs symétries. Une partie de la procédure rendait l'algorithme instable. Grâce à l'analyse minutieuse de Harald Helfgott, László Babai a corrigé son algorithme tout en conservant sa conclusion : le problème d'isomorphisme des graphes est plus facile qu'on ne le pensait.

Sean Bailly

H. Helfgott, <https://arxiv.org/abs/1701.04372> ; L. Babai, <https://arxiv.org/abs/1512.03547>

Que signifie ce 4 ‰ ?

Vincent Chaplot : Ce programme part d'un calcul simple : nos émissions mondiales sont de 8,9 gigatonnes de carbone d'origine organique par an ; pour les équilibrer, il faudrait fixer autant de carbone dans le sol en plus des 2400 gigatonnes qui y sont déjà. Or $8,9/2400$ égale environ 0,0037, soit à peu près 4 ‰. Le programme portant ce nom vise à étudier les moyens de séquestrer un supplément de 0,4 % du carbone organique qui s'y trouve déjà.

Est-ce possible ?

V. C. : Techniquement, nous avons des solutions, mais la question centrale est que sur les 149 millions de kilomètres carrés de terres émergées, seulement 10 à 20 % sont aujourd'hui des surfaces agricoles où nous pouvons agir. À long terme, si nous nous en donnons les moyens, nous pourrions modifier la séquestration du carbone de 50 % des terres émergées, par exemple en créant des barrières vertes dans le désert, en plantant des forêts ou des prairies. À court terme, nous ne pouvons agir que sur les terres cultivées en y introduisant de nouvelles variétés.

C'est l'objectif du projet Carbofarm que vous portez ?

V. C. : Oui. Il s'agit de déterminer pour divers pays quelles sont les variétés cultivées des principales

céréales déjà sélectionnées qui séquestrent le plus de carbone dans le sol. Nous voulons aussi rechercher les systèmes de cultures rendant le plus de services non seulement aux hommes, mais aussi au sol.

Au sol ? Que voulez-vous dire ?

V. C. : Le carbone est le principal composant de la matière organique, qui nourrit les microbes du sol (lesquels représentent 80 % de la biomasse terrestre) ; le carbone y est associé à l'azote, au phosphore, aux



Vincent Chaplot, directeur de recherche à l'IRD.

métaux, etc. La matière organique joue aussi le rôle d'une éponge pour l'eau, qu'elle filtre comme une station d'épuration.

Dans le cas de l'Afrique du Sud, quelle est la situation des sols ?

V. C. : Seulement 10 % de la surface de ce pays est en surfaces agricoles. Le reste consiste en savanes peu fertiles. La décroissance des stocks de carbone dans le sol s'est en effet intensifiée avec l'arrivée

de l'agriculture moderne au cours des deux derniers siècles et de ses abus d'engrais azotés, qui accélèrent la consommation de la matière organique du sol ; et aussi parce qu'une mauvaise gestion des savanes les a livrées à un pâturage sédentaire suivi d'une dégradation du sol.

Comment redresser la situation ?

V. C. : Avec Carbofarm, nous travaillons déjà à sélectionner des variétés de maïs et de blés qui augmentent les intrants organiques dans le sol ; s'agissant des savanes, il s'agit d'imiter le comportement des herbivores sauvages qui, au lieu de stationner comme les vaches dans leurs enclos, suivent l'herbe, pâturant intensément mais temporairement en un lieu avant de l'abandonner pour longtemps, laissant à la végétation le temps de revenir.

Et en France ?

V. C. : Outre l'agriculture intensive qui exerce toujours la même pression excessive sur l'écosystème, nous avons l'occasion offerte par l'énorme déprise agricole. De plus en plus de terres redeviennent disponibles pour la forêt ou les pâtures. Encore faudrait-il s'en occuper en les rassemblant et en les gérant.

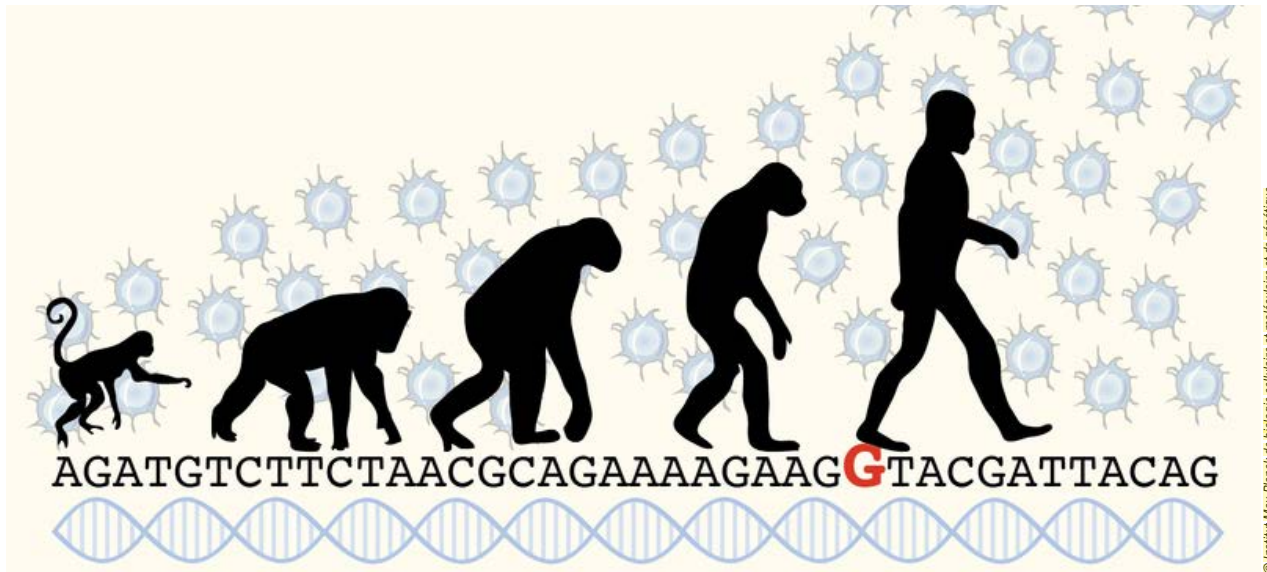
François Savatier

B. Minasny et al., *Geoderma*, vol. 292, pp. 59-86, 2017

Génétique

Une mutation génétique qui a profité au cerveau d'*Homo sapiens*

Une substitution d'une base dans un gène d'*Homo erectus* aurait provoqué une surproduction de neurones et fait franchir à l'évolution humaine une étape cruciale.



Une mutation d'une base sur un gène d'*Homo erectus* aurait été à l'origine d'un fort développement du cerveau humain.

Les plus grands progrès résultent parfois d'une erreur, d'un accident fortuit aux conséquences incalculables. Prenez le cerveau humain : cet organe d'une complexité inouïe pourrait aussi être le fruit d'un coup du sort. C'est ce qu'ont découvert le paléogénéticien suédois Svante Pääbo et ses collègues, spécialistes de l'ADN préhistorique.

L'événement clé qui a donné un coup de fouet à l'évolution de notre encéphale se serait produit il y a environ 500 000 ans, chez nos ancêtres *Homo erectus*, des hominidés dont le cerveau était, en ce temps, nettement moins volumineux – et probablement moins puissant et moins doué d'abstraction. Mais à cette époque, une mutation totalement aléatoire aurait remplacé, sur le double brin d'ADN d'un de ces lointains aïeux, une base azotée de type C par une base G. Un microévénement qui aurait provoqué une réaction en chaîne. Car du fait de ce changement, un trio de bases C, T, A aurait été remplacé par la séquence G, T, A. Or ce triplet est

interprété par la machinerie de transcription de l'ADN des cellules comme un signal de coupure. Autrement dit, l'ARN messager transcrit du gène concerné (noté *ARHGAP11A*) a été amputé de 55 nucléotides par rapport à sa version originale. D'où la production d'une protéine aux fonctions profondément modifiées.

Jugez plutôt : alors que la protéine de nos ancêtres *Homo erectus* régulait la croissance de filaments d'actine dans les neurones – des constituants du squelette interne des cellules –, la version *sapiens* stimule la division des neurones à partir de cellules mères, dites progénitrices, dans certaines zones cruciales du cerveau, les ventricules. Avec pour conséquence de produire beaucoup plus de neurones. Résultat : dans nos cerveaux modernes, les cellules progénitrices se divisent à un rythme accru, donnant naissance à de jeunes neurones qui migrent ensuite des ventricules vers la périphérie du cerveau, contribuant à la croissance du cortex ; lequel, à force de s'étendre,

est obligé de se plisser pour tenir de façon compacte à l'intérieur de la boîte crânienne, adoptant cet aspect replié caractéristique du cerveau humain.

D'ailleurs, en transférant la version mutée du gène à des souris, l'équipe de Svante Pääbo a constaté que le cerveau de ces rongeurs produisait des neurones à un rythme supérieur au taux habituel.

Il a donc peut-être suffi d'un changement ponctuel sur un seul maillon de l'ADN pour transformer un cerveau d'*Homo erectus* en cerveau d'*Homo sapiens*. Ce changement était probablement une erreur, un raté dans les mécanismes de réplication de l'ADN chez un *Homo erectus* anonyme dont on ne saura sans doute jamais s'il a vécu en Afrique de l'Ouest, en Asie ou en Europe, et qui est le père des hommes dotés de cerveaux modernes. Mais cette erreur s'est révélée un réel avantage évolutif et s'est imposée.

Sébastien Bohler

M. Florio et al., *Science Advances*, vol. 2, e1601941, 2016

900 centimètres cubes

C'est le volume du cerveau d'*Homo erectus*, contre 1 400 centimètres cubes chez *Homo sapiens*. Le cerveau de ce dernier est aussi très plissé, ce qui lui permet de contenir 86 milliards de neurones