

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.16 Livres du mois

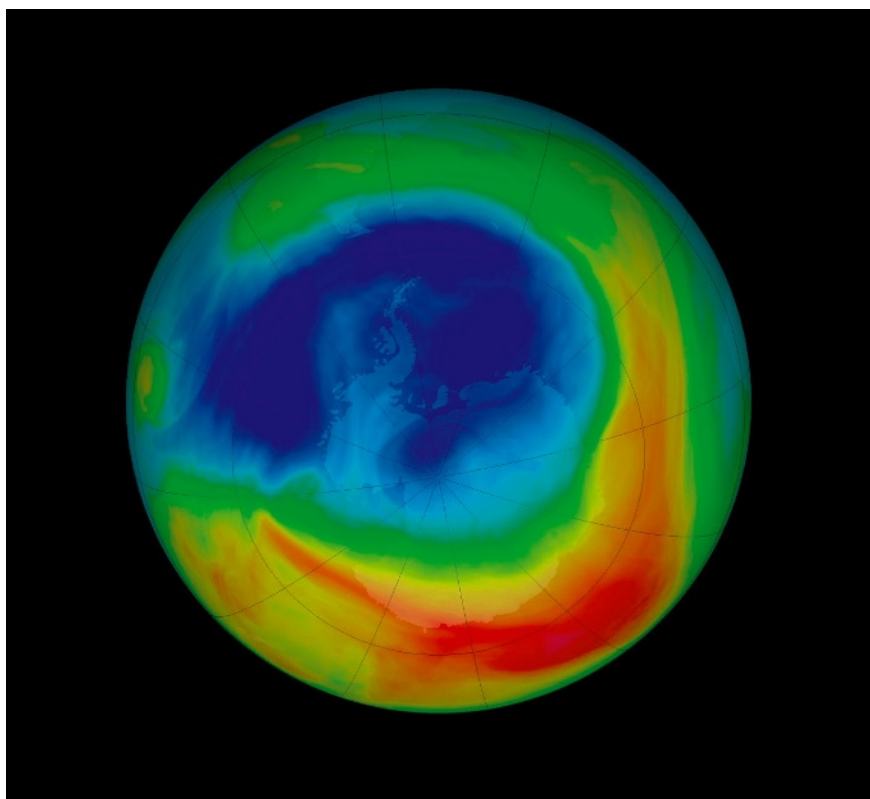
P.18 *Homo sapiens informaticus*

P.20 Questions de confiance

CLIMATOLOGIE

RÉTABLISSEMENT DE L'OZONE: DES EFFETS SUR LE CLIMAT

Le trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique tel qu'il était le 8 septembre 2019. Il se résorbe lentement avec les années.



L'appauvrissement de la couche d'ozone atmosphérique avait altéré le climat de l'hémisphère Sud. Mais avec le rétablissement de cette couche, le phénomène marque une pause.

Les émissions de chlorofluorocarbures (CFC) et autres espèces chimiques qui détruisent le trioxygène (ou ozone, O_3) ont aminci la couche d'ozone dans l'atmosphère. Au point qu'au début des années 1980, on a découvert dans cette couche stratosphérique un trou au-dessus de l'Antarctique. En 1987, un accord multilatéral, le protocole de Montréal, a banni l'usage des composés qui détruisent le trioxygène et, progressivement, des signes de rétablissement

de la couche d'ozone sont apparus. Toutefois, le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique a eu d'autres conséquences: il a modifié toute la circulation atmosphérique de l'hémisphère Sud, en resserrant autour du pôle Sud le vortex polaire – un grand courant circumpolaire troposphérique (donc sous la stratosphère), aussi nommé jet-stream.

Or Antara Banerjee, de l'université du Colorado, et ses collègues viennent d'extraire des données une information encourageante: depuis 2000, les

modifications de la circulation atmosphérique de l'hémisphère Sud, dont le resserrement du jet-stream autour du pôle, marquent une pause – ce qui est la conséquence des décisions du protocole de Montréal!

Le fait qu'un changement dans la stratosphère perturbe des vents troposphériques est surprenant. En effet, la stratosphère ne représentant que 15% de la masse atmosphérique, ses mouvements ont une capacité d'entraînement moindre que ceux de la troposphère qui est en dessous. Pour autant, tant les modèles que les observations confirment la sensibilité du vortex polaire à l'évolution des vents stratosphériques due aux effets thermiques de la raréfaction de l'ozone.

Afin d'étudier les tendances à l'origine de ces phénomènes, Antara Banerjee et ses collègues ont compilé les mesures de trois grandeurs depuis 1980 : la position de deux courants atmosphériques des latitudes moyennes ; la position du vortex polaire ; la latitude du bord sud de la cellule climatique tropicale. En déterminant les moyennes de ces grandeurs très variables, ils ont dégagé leurs tendances et mis en évidence une pause depuis 2000.

Toutefois, de multiples facteurs agissent simultanément sur la circulation atmosphérique. Afin de démêler cet écheveau, l'équipe américaine a procédé à de nombreuses simulations informatiques à l'aide de puissants programmes : d'une part, le CanESM2 (Canadian Earth system model version 2), un modèle climatique à base physique, d'autre part, des modèles de type CCM (Chemistry climate models), qui allient chimie et physique de l'atmosphère. Les chercheurs ont d'abord simulé le changement climatique observé en tenant compte de tous les facteurs connus : augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, changement des niveaux atmosphériques d'ozone et des composés qui la détruisent, éruptions volcaniques...

Ces simulations reproduisent fidèlement les variations climatiques observées, y compris le resserrement du jet-stream autour du pôle, puis l'arrêt de ce phénomène. Les chercheurs ont ensuite repris ce travail de simulation en n'introduisant qu'un seul, ou seulement quelques-uns, des facteurs à prendre en compte. Il en ressort que seules les simulations tenant compte de l'évolution des concentrations en gaz néfastes à l'ozone reproduisent correctement l'évolution de la circulation atmosphérique.

Ces résultats montrent qu'au cours des vingt dernières années, la reconstitution de l'ozone a agi suffisamment sur la circulation troposphérique pour surmonter l'influence contraire que l'augmentation des gaz à effet de serre a sur elle. Rien ne garantit toutefois que cela se poursuivra, car, à mesure que les niveaux d'ozone continueront à se rétablir, leur influence sur le climat deviendra plus faible que celle des gaz à effet de serre, lesquels domineront de plus en plus les changements futurs de la troposphère... ■

FRANÇOIS SAVATIER

A. Banerjee et al., *Nature*, vol. 579, pp. 544-548, 2020

Une nouvelle enzyme recycle les bouteilles PET

Avec une production annuelle mondiale de 70 millions de tonnes, le recyclage du plastique PET est un enjeu environnemental majeur. Une équipe de chercheurs industriels et académiques a développé une nouvelle enzyme avec une efficacité inégalée. Vincent Tournier, de la société Carbios, nous présente ce résultat.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

VINCENT TOURNIER
responsable ingénierie
enzymatique de Carbios

Dans quel contexte s'inscrit la production de PET ?

On estime la production mondiale de plastique à 359 millions de tonnes par an, dont 70 millions de tonnes de PET (polyéthylène téréphtalate). Ce dernier sert à la fabrication d'emballages, de bouteilles (500 milliards chaque année) et à la confection de fibres textiles (on parle alors de polyester). Le plastique PET est l'un des mieux collectés : on en récupère 70 % à l'échelle mondiale, mais on n'en recycle que 10 %. Le reste est enfoui, incinéré ou finit dans la nature. Il n'y a cependant pas de dégradation naturelle : le PET est broyé et réduit en toutes petites particules, mais il ne disparaît pas complètement. C'est un plastique non biodégradable, extrêmement résistant et stable.

En quoi consiste actuellement son recyclage ?

Une approche thermomécanique consiste à refondre le plastique, mais le matériau se dégrade à chaque cycle et perd en qualités mécaniques. On est davantage dans une logique de prolongement de vie que dans un vrai recyclage. On connaît aussi des enzymes capables de dégrader le PET, mais leur efficacité est relativement faible et insuffisante pour une application commerciale.

Nous nous sommes donc intéressés à une nouvelle enzyme, une cutinase nommée « LCC », découverte en 2012 par une équipe japonaise dans un compost de feuilles. Cette enzyme s'attaque à la cutine, un biopolymère lipidique intégré à la cuticule protégeant la surface des feuilles végétales, en coupant des liaisons ester. Or le PET est un polyester et nous avons constaté lors d'une évaluation comparative que la LCC est la plus efficace de toutes les enzymes connues pour dépolymériser le PET.

Quelles améliorations avez-vous réalisées ?

Grâce à la collaboration entre la société Carbios, à Clermont-Ferrand, et le Toulouse Biotechnology Institute (unité mixte de recherche sous la tutelle de l'Insa Toulouse, de Inrae et du CNRS), nous avons modifié la séquence d'acides aminés de l'enzyme LCC pour adapter au mieux la forme tridimensionnelle du site actif de l'enzyme au PET. Nous avons identifié 11 cibles potentiellement intéressantes dans la séquence et avons testé les 209 variantes possibles. Puis nous avons combiné les solutions les plus efficaces. La protéine LCC résultante se fixe alors plus efficacement aux molécules du plastique et a un pouvoir de coupure plus rapide, ce qui se traduit par un gain de vitesse de la réaction. Nous avons aussi amélioré la stabilité thermique de l'enzyme pour qu'elle soit efficace et stable à plus haute température (72 °C), quand les chaînes de PET sont plus mobiles et donc plus accessibles à l'enzyme.

Cette enzyme est 100 fois plus efficace que les autres, et dépolymérise 90 % de déchets de PET en seulement 10 heures. Elle décompose le PET en ses deux monomères de base, l'acide téréphtalique et le monoéthylène-glycol. Nous avons ensuite utilisé l'acide téréphtalique obtenu pour refabriquer des bouteilles en PET : ses propriétés sont équivalentes à une production *de novo*. Ce qui montre la possibilité d'établir une économie circulaire dans le secteur du plastique PET.

Êtes-vous proches d'une application industrielle ?

Nous avons conçu le procédé complet avec, comme unité de base, un réacteur pilote de 1 mètre cube avec lequel nous avons obtenu ces résultats. Nous sommes en train de travailler sur un démonstrateur 20 fois plus grand pour améliorer les performances du procédé en conditions industrielles réelles. L'objectif est de commercialiser la licence pour des usines dès 2022. ■

V. Tournier et al., *Nature*, vol. 580, pp. 216-219, 2020

PHYSIQUE

L'EXOTISME DES ANYONS SE CONFIRME

Grâce à un collisionneur d'électrons miniature, des physiciens ont mis en évidence le comportement collectif particulier des anyons, des entités quantiques intermédiaires entre fermions et bosons.

Si, lors d'une partie de jeu d'échecs, un trouble-fête échange un pion blanc avec un pion noir, il change radicalement la situation sur le plateau. En revanche, l'inversion de deux pions noirs identiques n'a aucune incidence. À l'échelle des particules et des lois quantiques qui les régissent, on a une situation un peu semblable : l'échange de deux bosons identiques, par exemple des photons, ne modifie rien, contrairement à l'échange de deux fermions identiques, des électrons par exemple. Il en résulte des comportements collectifs différents : bosons et fermions obéissent à des lois statistiques distinctes. Ainsi, deux fermions identiques ne peuvent pas adopter le même état quantique et tendent donc à se repousser : c'est le « principe d'exclusion de Pauli ». Les bosons, eux, n'y sont pas soumis et peuvent très bien se regrouper.

Cette division en deux classes s'applique en trois dimensions, mais les physiciens prévoient que dans des systèmes bidimensionnels, l'existence d'« anyons », au comportement intermédiaire entre celui des fermions et celui des bosons, est possible. Or Gwendal Fève, à l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues viennent de mettre en évidence la statistique quantique exotique de ces entités.

De quel genre d'objets s'agit-il ? Les anyons ne sont pas des particules fondamentales comme les électrons ou les photons, mais des quasiparticules, c'est-à-dire des formes d'excitation collective des particules dans la matière (à l'instar des phonons, qui sont les quanta de vibrations dans un solide). Des anyons sont par exemple produits dans des dispositifs présentant l'effet Hall quantique. Celui-ci se manifeste à une température proche du zéro absolu dans un matériau conducteur bidimensionnel soumis à un champ magnétique intense. L'effet se traduit par une conductance (l'inverse de la résistance électrique) quantifiée : quand on augmente le champ magnétique, elle croît par paliers, déterminés par un nombre entier ou fractionnaire noté ν .

En 1983, l'Américain Robert Laughlin a expliqué le phénomène où ν est fractionnaire en invoquant des anyons. Cependant, la signature de la statistique des anyons restait à

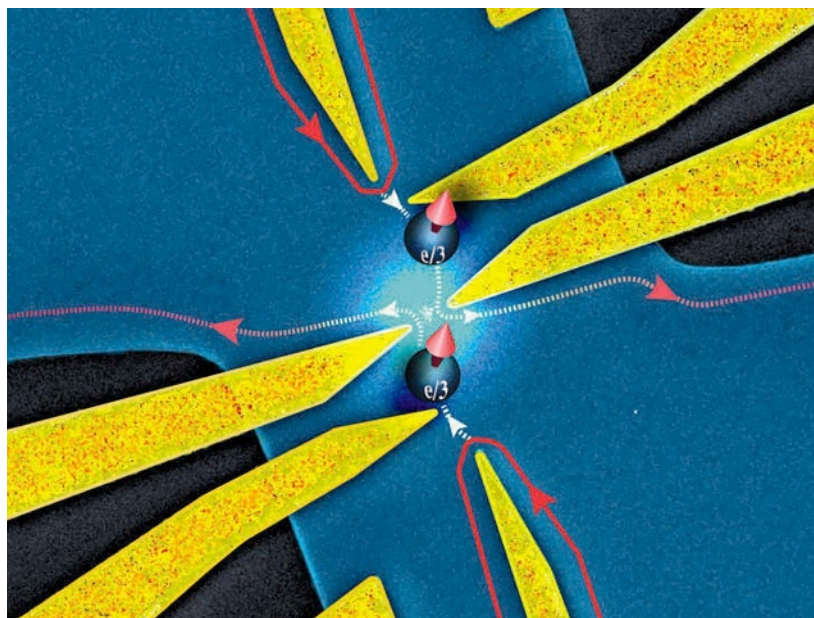


Image au microscope électronique (en fausses couleurs) du collisionneur anyonique refroidi à 30 millikelvins et soumis à un champ magnétique de 13 teslas. Le gaz bidimensionnel d'électrons est représenté en bleu. Les quasiparticules se déplacent le long des canaux de bord (en rouge). Les deux paires d'électrodes (couleur or, en haut et en bas) les orientent pour entrer en collision au centre. Les deux électrodes (à gauche et à droite du point de collision) canalisent les anyons après la collision afin de mesurer les courants (en pointillés).

mettre au jour. Pour y parvenir, Gwendal Fève et ses collègues ont mis en œuvre un collisionneur d'anyons dans un gaz d'électrons bidimensionnel à l'intérieur d'une puce électronique longue de quelques micromètres, fabriquée au Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau. Les chercheurs ont placé leur dispositif dans un régime d'effet Hall quantique fractionnaire ($\nu = 1/3$). Les anyons produits ont alors été amenés à entrer en collision. Ils ne se repoussent pas systématiquement (comme le feraient des fermions) et peuvent se regrouper (comme des bosons).

En mesurant les corrélations entre les courants produits après la collision, Gwendal Fève et ses collègues ont constaté un bon accord entre les prédictions théoriques et leurs mesures. Ils ont ainsi mis en évidence la statistique intermédiaire entre celle des fermions et celle des bosons. L'équipe espère maintenant produire des anyons avec d'autres valeurs de ν , qui pourraient se révéler utiles dans la conception d'ordinateurs quantiques. ■

S. B.

H. Bartolomei et al., *Science*, vol. 368, pp. 173-177, 2020