

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 téréphthalate). 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 téréphthalique et le monoéthylène-glycol. Nous avons ensuite utilisé l'acide téréphthalique 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

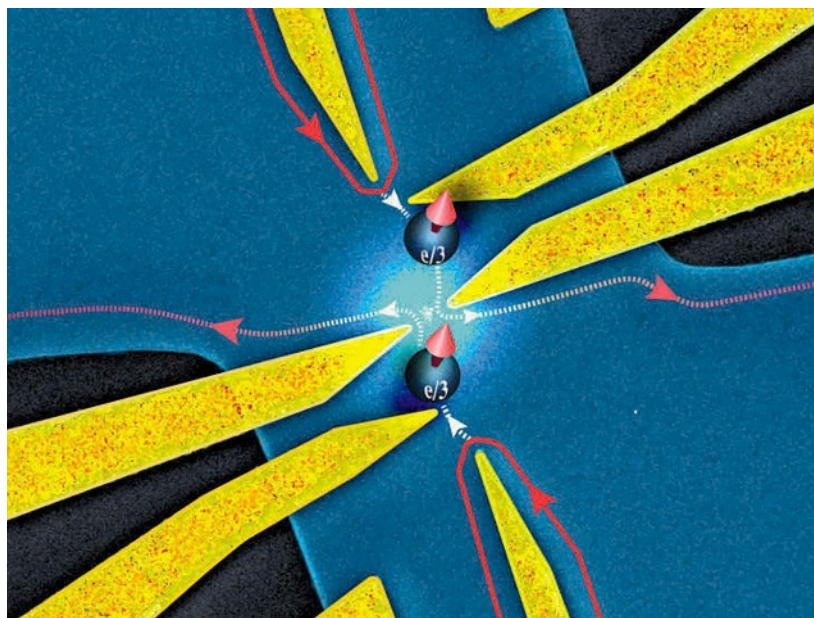


Image au microscope électronique (en fausses couleurs) du collisionneur anyonique refroidi à 30 millikelvins et soumis à un champ magnétique de 13 teslas. Le gaz bidimensionnel d'électrons est représenté en bleu. Les quasiparticules se déplacent le long des canaux de bord (en rouge). Les deux paires 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

EN BREF

ÇA DÉCOIFFE SUR UNE NAIN BRUNE

En combinant des mesures dans les domaines radio et infrarouge, il est possible de mesurer la vitesse des vents sur Jupiter : de l'ordre de 360 kilomètres par heure. Katelyn Allers, de l'université Bucknell, aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé la même technique pour une naine brune (notée 2MASS J1047 + 21), un astre plus massif qu'une planète mais trop petit pour déclencher les processus de fusion nucléaire qui en auraient fait une étoile. Résultat : 2 290 kilomètres par heure !

Science, 9 avril 2020

LA POUSSIÈRE REVUE À LA HAUSSE

La poussière minérale grossière (d'un diamètre supérieur à 5 micromètres) joue un rôle important dans le climat. Elle interagit notamment avec les nuages et contribue au réchauffement. Adeyemi Adebisi et Jasper Kok, de l'université de Californie à Los Angeles, ont réévalué la quantité de cette poussière présente dans l'atmosphère. Leur estimation s'établit à 17 millions de tonnes, soit quatre fois la valeur généralement utilisée dans les modèles climatiques...

Science Advances, 8 avril 2020

LA SENTINELLE DES RHINOCÉROS

Dans la savane, les oiseaux pique-bœufs se nourrissent de parasites d'autres animaux. On les trouve souvent perchés sur le dos de grands mammifères. Roan Plotz et Wayne Linklater, de l'université Nelson-Mandela, en Afrique du Sud, ont constaté que les rhinocéros noirs, animaux connus pour leur mauvaise vue, détectaient mieux des humains s'approchant s'ils étaient accompagnés de pique-bœufs. Le mammifère interpréterait les cris de l'oiseau, cris qui le mettraient alors en alerte.

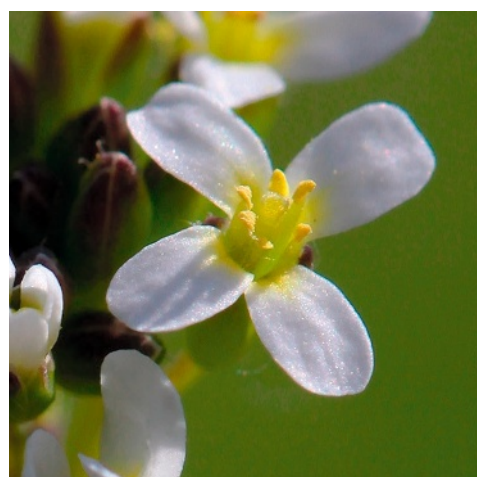
Current Biology, 9 avril 2020

BIOLOGIE VÉGÉTALE

COMMENT LA FLEUR ÉVITE LA POLYSPERMIE

La reproduction sexuée chez les végétaux est soumise à une contrainte majeure : les cellules reproductrices mâles, contenues dans les grains de pollen, n'ont pas de mobilité propre. Une fois déposés par le vent ou des insectes sur une autre plante, les grains de pollen germent et forment un tube qui croît dans le pistil, où la fécondation a lieu. Fait étonnant, si généralement plusieurs grains de pollen germent sur un même pistil, les ovules ne laissent entrer qu'un seul tube pollinique et les cas de polyspermie (fécondation multiple de l'ovule) sont rares. Alice Cheung, de l'université du Massachusetts à Amherst, aux États-Unis, et son équipe se sont intéressées aux mécanismes qui empêchent la polyspermie chez l'arabette des dames. Elles avaient déjà observé que de multiples tubes polliniques pénétraient dans les ovules chez des mutants ne produisant pas une protéine nommée «Feronia». Leur nouvelle étude révèle que cette protéine induit la mise en place d'une barrière à la fois mécanique et chimique après l'entrée du premier tube pollinique dans l'ovule.

Chez les végétaux, l'ovule comporte plusieurs cellules, dont deux «synergides» qui constituent le point d'entrée pour le tube



Chez l'arabette des dames, la protéine Feronia évite une fécondation multiple des ovules.

pollinique. La paroi des synergides est malléable, ce qui permet le passage du tube. Or l'équipe a montré que Feronia mobilise des molécules fibreuses à la surface des synergides quand un tube pollinique y pénètre. Une barrière mécanique s'établit alors. Par ailleurs, Feronia intervient dans la production d'un gaz qui interrompt l'émission, par l'ovule, de protéines attirant les tubes polliniques. Une double action très efficace contre la polyspermie. ■

CORALINE MADEC

Q. Duan et al., *Nature*, vol. 579, pp.561-566, 2020

GÉOSCIENCES

UNE LOI POUR LE GLISSEMENT DES GLACIERS

Lucas Zoet et Neal Iverson, des universités du Wisconsin et de l'Iowa, ont modélisé la résistance au mouvement des glaciers glissant sur un lit mou. Ils ont d'abord simulé le phénomène à l'aide d'un appareil faisant tourner un anneau de glace sous pression sur 6 centimètres de sédiments sableux saturés d'eau, chargés en gravier ou pas. Ils ont constaté que la résistance au glissement augmente avec la vitesse de glissement v_g , jusqu'à une vitesse de transition v^* , pour laquelle la force de cisaillement à l'origine de la déformation du lit mou égale la force de frottement mécanique T , qui est proportionnelle à la pression (loi de Coulomb); au-delà, T domine. Les chercheurs ont traduit ces observations par une loi : la résistance au glissement est égale au produit de T



Un exemple groenlandais de lit mou de glacier libéré par le retrait glaciaire. On note la façon dont les cailloux poussés par la glace labourent le lit glaciaire.

par le rapport $v_g/(v_g + v^*)$ élevé à la puissance 0,2. Or cette loi décrit bien aussi le glissement des glaciers sur lit rocheux. Elle est donc «universelle». Reste à l'exploiter pour estimer la masse de glace qui se déverse dans les mers polaires. ■

F. S.

L. K. Zoet et N. R. Iverson, *Science*, vol. 368, pp. 76-78, 2020