

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