



Certifié PEFC

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

É DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LUMIÈRE SUR LES MOLÉCULES DU COSMOS



u'y a-t-il dans l'espace lointain? Tout ce que nous savons des étoiles, exoplanètes, galaxies et autres objets astrophysiques repose en très grande partie sur une entité physique qui paraît d'une grande banalité tant on la côtoie au quotidien: la lumière. Et cela pas juste en observant le ciel à l'œil nu

ou en le scrutant visuellement à travers un télescope. C'est en effet grâce à la spectroscopie, c'est-à-dire l'analyse fine du rayonnement lumineux (et plus généralement électromagnétique), que l'on recueille des informations précises sur la matière présente dans le cosmos et les phénomènes qui s'y déroulent.

La découverte récente que l'astrochimiste Ryan Fortenberry relate dans ce numéro (*voir pages 22 à 30*) ne fait pas exception, et illustre même de façon éclatante le rôle capital de la spectroscopie en astronomie. Il s'agit de la mise en évidence de l'ion d'hydrure d'hélium, HeH⁺, dans une lointaine nébuleuse. La découverte est d'importance. En effet, depuis plusieurs décennies, les théoriciens supposent avec de bonnes raisons que cet ion inexistant sur Terre, très instable et quelque peu exotique – il comporte un atome d'hélium, élément chimiquement inerte qui ne réagit qu'exceptionnellement avec d'autres – a été la première molécule formée dans l'Univers peu après le Big Bang. Et que cette molécule a favorisé certains processus chimiques qui se sont déroulés ensuite, orientant donc la cosmochimie.

L'hydrure d'hélium s'ajoute ainsi aux quelque 200 autres molécules identifiées dans l'espace. Et offre à Ryan Fortenberry l'occasion de nous expliquer que parmi ces molécules, certaines, repérées assez récemment, éclairent une énigme tenace de l'astrophysique, celle des «bandes interstellaires diffuses». Encore une histoire de spectres!

D'autres sujets passionnants vous attendent dans ce numéro: les nombres transcendants, le pourquoi des problèmes de dents, le rôle du hasard dans le vivant, un mélangeur inventé grâce à la géophysique... De quoi penser à autre chose que les questions relatives au Covid-19, une actualité sur laquelle *Pour la Science* vous propose depuis le mois de mars de nombreux articles en ligne et en accès libre ([sur www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)). ■

S

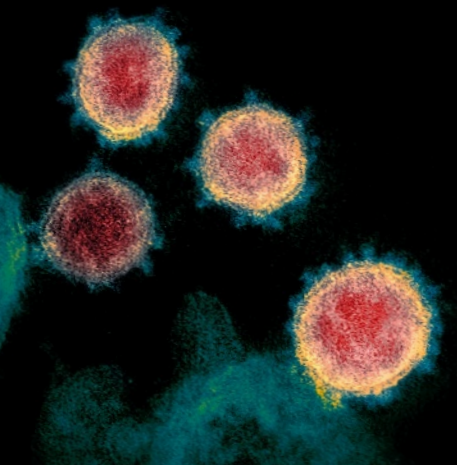
OMMAIRE

N° 512 /
Juin 2020

COVID-19

RETROUVEZ TOUS
NOS ARTICLES RELATIFS
À LA PANDÉMIE
DE COVID-19
EN ACCÈS LIBRE SUR
NOTRE SITE INTERNET :

**WWW.
POURLASCIENCE.FR/
TAGS/COVID-19**



© NIAD-RML

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Rétablissement de l'ozone: des effets sur le climat
- Une nouvelle enzyme recycle les bouteilles PET
- L'exotisme des anyons se confirme
- Comment la fleur évite la polyspermie
- Des traces de dinosaures au plafond
- Un arsenal de gènes métaboliques dans les virus géants
- L'aversion au risque de la fourmi
- Quand *Homo erectus* côtoyait les paranthropes
- La pluie impliquée dans une éruption?

P. 16

LES LIVRES DU MOIS

P. 18

HOMO SAPIENS INFORMATICS

L'école aux prises avec la fracture numérique

Gilles Dowek

P. 20

QUESTIONS DE CONFIANCE

Covid-19: confusion entre politique et science

Virginie Tournay



En couverture :

© Mondolith Studios

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.

GRANDS FORMATS



P. 36

ÉVOLUTION

AUX RACINES DE NOS PROBLÈMES DENTAIRES

Peter Ungar

Dans les populations humaines d'aujourd'hui, les dents sont souvent cariées, mal alignées et à l'étroit dans les mâchoires. Principal suspect: l'alimentation moderne.



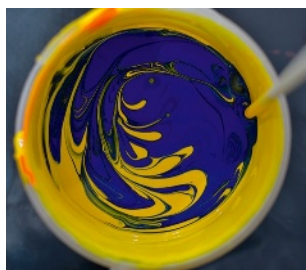
P. 50

BIOLOGIE

CE QUE LE VIVANT DOIT AU HASARD

Hervé Le Guyader

Quelle est la place du hasard en biologie? Soulevée dès l'aube de la biologie moléculaire, cette question reçoit depuis quelques années de nouvelles réponses à toutes les échelles du vivant.



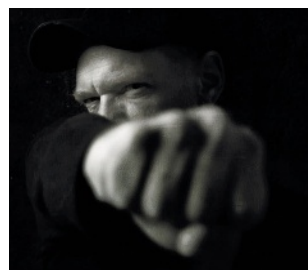
P. 44

TECHNOLOGIE

MÉLANGER EN S'INSPIRANT DU MOUVEMENT DE LA TERRE

Patrice Meunier

Comment mélanger un liquide avec efficacité? À partir de leurs recherches fondamentales, des géophysiciens ont breveté un procédé étonnamment simple: faire tourner le récipient sur lui-même en l'inclinant légèrement!



P. 58

NEUROSCIENCES

DANS LES ROUAGES CÉRÉBRAUX DE L'AGRESSIVITÉ

R. Douglas Fields

Au-delà de la morale, toute action violente présente un risque pour l'individu. Quels mécanismes neuronaux peuvent alors la déclencher? Les chercheurs ont des pistes.



P. 68

ARCHÉOLOGIE

LIRE DES PAPYRUS CARBONISÉS ?

Hannes Hoffmann

Au XVIII^e siècle, la fouille d'une villa d'Herculanum a livré quelque 1800 rouleaux de papyrus carbonisés datant de l'Antiquité. Les tentatives de les dérouler en ont détruit beaucoup. Mais avec le développement de méthodes d'imagerie non destructives, l'espoir de les lire renaît.



P. 76

HISTOIRE DES SCIENCES

DU FLAIR DE WATERTON À L'ODORAT DES OISEAUX

Benoît Grison

Les vautours repèrent-ils les carcasses à l'odeur ? En 1826, cette question fut le point de départ d'une controverse qui ne trouva son dénouement que ces dernières années.



P. 22

ASTROCHIMIE

LA PREMIÈRE MOLÉCULE DE L'UNIVERS

Ryan C. Fortenberry

Depuis longtemps, les chercheurs pensaient que l'ion d'hydrure d'hélium, HeH^+ , avait été la première molécule à se former dans le cosmos. Mais cet ion restait impossible à détecter dans l'espace. Jusqu'à tout récemment...

RENDEZ-VOUS

P. 82

LOGIQUE & CALCUL

À LA RECHERCHE DES NOMBRES TRANSCENDANTS

Jean-Paul Delahaye

Les nombres irrationnels, qu'ils soient algébriques ou transcendants, se laissent approcher plus ou moins difficilement par des suites de nombres rationnels. La mesure de cette difficulté permet de les classer.

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Comment volent les insectes

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Sur les traces des poissons des glaces

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un bon goût de fraises

Hervé This

P. 98

À PICORER

CAHIER PARTENAIRE

Fukushima
Que devient le césium
radioactif dans les forêts ?

Commandité par **IRSN**

pages I à III

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.16 Livres du mois

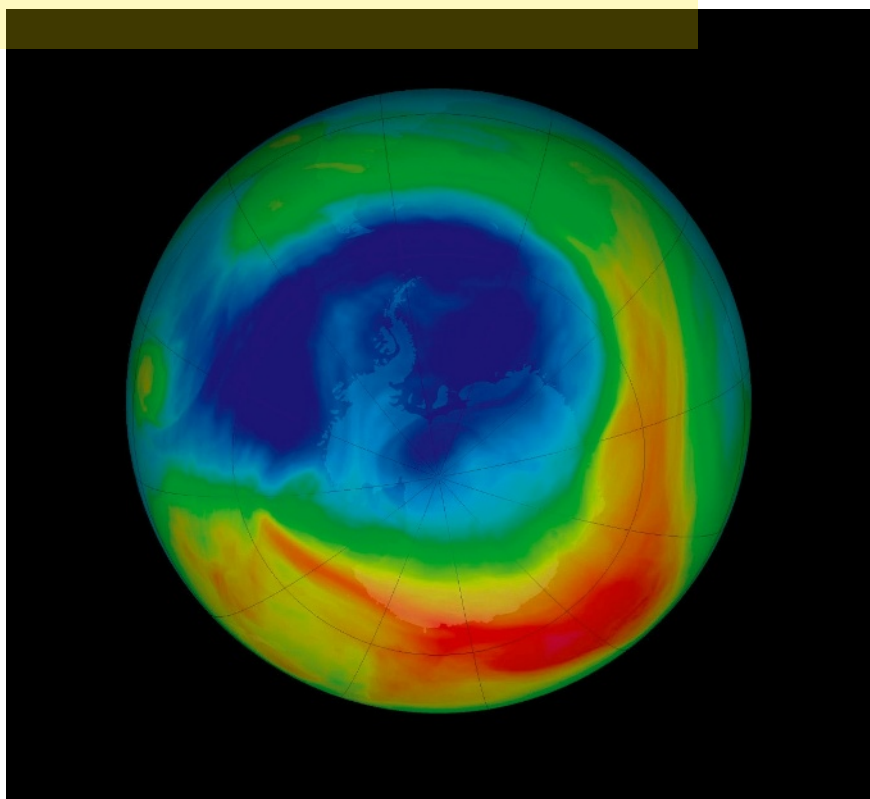
P.18 *Homo sapiens informaticus*

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