

Entretien avec FRANÇOISE COMBES, Médaille d'or 2020 du CNRS



POUR LA

Édition française de Scientific American

SCIENCE

MATHÉMATIQUES
**DES FONCTIONS
PATHOLOGIQUES
MAIS UTILES**

BIOLOGIE
**LE GÉNOME,
UN FOUILLIS
BIEN ORDONNÉ**

ÉCONOMIE
**JOSEPH STIGLITZ :
« LE PIB EST UN INDICATEUR
TRÈS INSUFFISANT »**

NOVEMBRE 2020
N° 517

'Oumuamua, Borissov...

LES VISITEURS INTERSTELLAIRES

Enquête sur ces étranges objets
venus de mondes lointains



DUNE

LA SCIENCE DU
ROMAN CULTE

L 13256 - 517 - F: 6,90 € - RD



Que sais-je?

Une question à toutes les réponses



Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuël

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Charlotte Calament

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Charline Buché

Chef de produit: Eléna Delanne

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétaire général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

François Aguet, Patrick Bachélery,

Maud Bruguère, Thierry Gaude, Natacha Gillet,

Jean-Christophe Glaszmann, Fatima Mechta-Grigoriou,

Marco Mira d'Ercole, Franck Selsis, Frédéric Thomas,

Elena Tosetto, Martine Zaïda

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 03 67 07 98 17

Adresse postale:

Next2C - Service abonnements Pour La Science

26 bd du Président-Wilson

CS 4003267085

Strasbourg Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmuth

President: Dean Sanderson

Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30%

«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



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

DES TÉMOINS D'AUTRES MONDES

Le voyage vers des mondes lointains, au-delà du Système solaire, exerce une grande fascination mais reste un rêve inaccessible. Heureusement, les auteurs de science-fiction comme Frank Herbert avec son roman *Dune*, qui fait l'objet d'une nouvelle adaptation au cinéma, atténuent notre frustration: grâce à leur puissante imagination, ils nous font voyager virtuellement, tout en gardant une certaine vraisemblance scientifique, dans des univers peuplés de planètes, d'organismes et de civilisations étranges (voir pages 72 à 78).

Mais s'il nous est impossible de rendre visite physiquement à des mondes distants de plusieurs années-lumière, ceux-ci ne pourraient-ils pas venir à nous? C'est en quelque sorte ce qui s'est passé avec la découverte récente de deux corps célestes sortant de l'ordinaire et ayant pour noms 'Oumuamua et Borissov: leur vitesse, trop élevée, indique qu'ils ne sont pas originaires du Système solaire!

Alors d'où viennent-ils et quelle est leur nature? C'est à ces questions que tentent de répondre dans ce numéro les astronomes David Jewitt et Amaya Moro-Martín (voir pages 24 à 32). Une enquête qui fait le tour des hypothèses avancées à ce jour - y compris celle, peu plausible, affirmant que 'Oumuamua serait une fusée d'une civilisation extraterrestre...

Que des petits hommes verts ne soient pas à l'origine de ces bolides n'enlève rien à leur intérêt: sans doute en provenance d'autres systèmes stellaires, ces objets portent en eux de précieuses informations sur le milieu où ils sont nés et sur la formation des planètes. Reste à collecter toutes ces informations - un grand défi étant donné la fugacité de ces visiteurs interstellaires. Mais avec l'abondance supposée de tels corps et le développement de nouveaux moyens pour les repérer, il est permis d'espérer que la frustration des astronomes n'aura qu'un temps. ■

SOMMAIRE

N° 517 /
Novembre 2020



POUR LA
SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Un atlas de l'expression des gènes chez l'humain
- La fonte des calottes glaciaires réestimée
- Sous des volcans effusifs, un étonnant magma
- Comment le pollen se fraye le bon chemin
- Flotter sous un liquide en lévitation
- Comment la lymphocyte protège les cellules cancéreuses
- Phosphine et vie sur Vénus
- Des traces de pas de 120 000 ans en Arabie
- Françoise Combes, Médaille d'or du CNRS

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

HOMO SAPIENS INFORMATICS

La souveraineté n'est pas une question de nation

Gilles Dowek

P. 22

QUESTIONS DE CONFIANCE

Du chercheur au youtubeur

Virginie Tournay



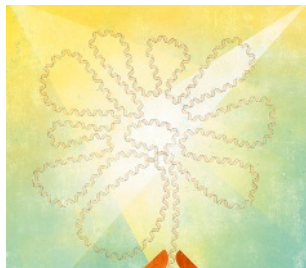
En couverture :

© Shutterstock.com/Zodar (fond), ESO/M. Kornmesser ('Oumuamua'); © 2020 Warner Bros. Entertainment Inc. Tous droits réservés/Chiabella James (Dune); © Frédérique Plas/LERMA/CNRS Photothèque (Françoise Combes)

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. 34

BIOLOGIE

LE GÉNOME, UN FOUILLIS BIEN ORDONNÉ

Erez Lieberman Aiden

L'ADN de nos cellules est bien plus organisé dans l'espace qu'on ne le pensait. Il présente des domaines à différentes échelles et d'étonnantes boucles mouvantes...



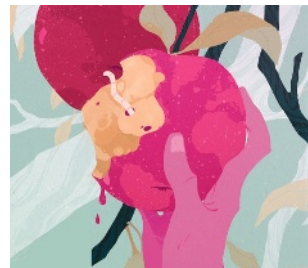
P. 44

ANTHROPOLOGIE

LA SOCIABILITÉ, CLÉ DU SUCCÈS DE « SAPIENS »

Brian Hare et Vanessa Woods

Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il surpassé les autres espèces humaines? Peut-être parce qu'un processus d'autodomestication a favorisé l'apparition, chez nos ancêtres et leurs descendants, d'une plus grande sociabilité.



P. 56

ÉCONOMIE

PIB : UN INDICATEUR TRÈS INSUFFISANT

Joseph Stiglitz

À force de se focaliser sur un seul indicateur économique, le produit intérieur brut, ou PIB, de nombreux pays ont vu la santé et le bien-être de leurs habitants, ainsi que l'environnement, se détériorer. Par quoi faudrait-il compléter ce chiffre?



P. 64

HISTOIRE DES SCIENCES

LA MÉDECINE ENTRE ÉPIDÉMIES ET POLITIQUE... SOUS LA RÉVOLUTION

Jean-Luc Chappey

En 1789, les médecins se sont retrouvés au cœur de jeux de pouvoir visant à préserver la santé des populations sans pour autant entraver ni les nouvelles libertés... ni l'économie de guerre.



P.72

SCIENCE & FICTION

LE DISTILLE DE «DUNE», RECYCLEUR ULTIME

Roland Lehoucq
et Jean-Sébastien Steyer

Dans la saga *Dune*, les habitants de la planète désertique Arrakis portent des «distilles», combinaisons qui recyclent l'eau de la transpiration, de l'urine... Un chapitre du nouveau livre *Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers* interroge le réalisme de ces dispositifs.

COMMUNIQUÉ
PAGES I À IV (APRÈS P. 52)

L'intelligence artificielle
au service
du réseau électrique

En partenariat avec

enedis
L'ÉLECTRICITÉ EN RÉSEAU

À LA UNE



P.24

ASTROPHYSIQUE

LES PREMIERS VISITEURS INTERSTELLAIRES

David Jewitt

Les astronomes ont récemment découvert dans le voisinage du Soleil des objets n'appartenant pas au Système solaire. Certes, ils avaient anticipé la présence de tels visiteurs venus de très loin. Mais les caractéristiques de l'un d'eux, nommé 'Oumuamua, intriguent les chercheurs.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

DES FONCTIONS MONSTRUEUSES MAIS UTILES

Jean-Paul Delahaye

En imaginant des fonctions bizarres, les mathématiciens mettent à l'épreuve leurs intuitions. Ces fonctions se révèlent aussi utiles pour modéliser des phénomènes naturels.

P.86

ART & SCIENCE

Voir la confiance en peinture

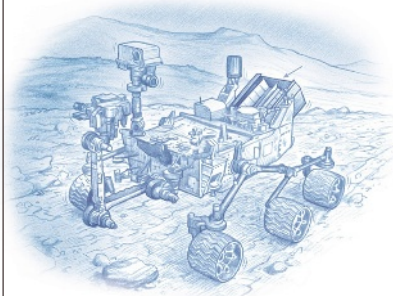
Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

De l'énergie nucléaire à petite échelle

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik



P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

Ce que la phylogénie raconte des épidémies

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Du bleu métallique en cuisine

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 *Homo sapiens informaticus*

P.22 Questions de confiance

GÉNÉTIQUE

UN ATLAS DE L'EXPRESSION DES GÈNES CHEZ L'HUMAIN



D'un individu à l'autre, le génome humain présente de multiples variations, dont on commence à cartographier les effets sur la régulation de l'expression des gènes.

Un consortium international a cartographié l'expression des gènes dans plus de 50 tissus du corps humain et mis en évidence l'ensemble de ses variations d'un individu à l'autre.

Séquencer le génome humain est une chose. Cartographier quels gènes sont exprimés dans quelles cellules de l'organisme, recenser les différences d'un individu à l'autre et repérer comment cette expression différentielle est orchestrée en sont une autre. C'est pourtant le défi relevé par plusieurs projets internationaux d'envergure comme *Encode*, lancé en 2003 dans la continuité du séquençage du génome humain, le *Human Cell Atlas*, lancé en 2016, ou encore le projet *Genotype-Tissue Expression (GTEx)*.

Démarré en 2010 avec pour objectif d'établir un catalogue des effets des variations génétiques sur l'expression des gènes dans de nombreux tissus humains, ce dernier vient d'achever sa troisième et dernière phase.

Dès que l'on a su séquencer le génome humain, on a commencé à examiner les variations génétiques d'un individu à l'autre. Toutefois, on s'est vite aperçu que cartographier ces variations ne suffisait pas pour comprendre leur implication dans le fonctionnement de l'organisme et, notamment, leur influence sur le risque de développer des maladies.

D'autant que la plupart des variations concernaient des régions non codantes du génome, qui ne produisaient pas de protéines et intervenaient donc vraisemblablement dans la régulation de cette production. On s'est donc lancé dans l'analyse fonctionnelle du génome.

Une méthode consiste à partir en quête de séquences dont la variation d'un individu à l'autre expliquerait celle du profil d'expression d'un ou plusieurs gènes. Pour répertorier ces séquences régulatrices, nommées eQTL, on compare le profil d'expression des gènes chez plusieurs dizaines voire centaines d'individus et l'on recherche si des variations dans le génome sont associées à tel ou tel profil.

C'est ce que le consortium GTEx a fait pour chacun des 17382 échantillons

de 54 tissus différents qu'il a prélevés *post mortem* sur 838 donneurs. Pour chaque échantillon, il a séquencé d'une part le génome, à la recherche de variations génétiques, et d'autre part le transcriptome, c'est-à-dire l'ensemble des ARN messagers produits (les intermédiaires de fabrication des protéines), dont il a repéré et quantifié chacun : plus un ARN messager était présent, plus le gène associé avait été exprimé. Le consortium a ainsi relié le niveau d'expression de quelque 20 000 gènes humains à des variations sur plusieurs millions de séquences – les fameux eQTL recherchés. Puis le consortium a commencé à exploiter cette base de données.

Dans une étude sur quelque 15 000 échantillons issus de 49 tissus, il a ainsi observé que l'expression de la quasi-totalité des gènes était associée à une ou plusieurs séquences eQTL. Dans une autre, il propose une méthode pour extraire des données la composition cellulaire des tissus et en déduire la régulation de l'expression des gènes spécifique à certains types de cellules. Dans une autre encore, le consortium a identifié des variants génétiques rares associés à un profil particulièrement anormal d'expression des gènes, comme un variant d'APOE, un gène impliqué dans diverses maladies neurologiques. Il s'est aussi lancé dans l'exploration des différences liées au sexe : dans presque tous les tissus, il a observé des différences d'expression de gènes entre les hommes et les femmes. Plusieurs centaines à plusieurs milliers de gènes sont concernés selon les tissus, même si l'effet est léger.

Ces études ne sont que quelques exemples de l'horizon ouvert par cette base de données. Évidemment, elle a ses limites. Les donneurs sont pour la plupart des Américains d'origine européenne, les deux tiers sont des hommes et plus de la moitié des échantillons proviennent de personnes âgées de 50 ans et plus. Néanmoins, en accès libre, elle reste un outil précieux que de nombreuses équipes utilisent déjà pour y tester des hypothèses ou répondre à des questions précises, comme montrer que de telles données aideraient à prédire les effets secondaires d'un médicament lors d'un essai clinique. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

The GTEx Consortium, *Science*, vol. 369, Special section, 2020

La fonte des calottes glaciaires réestimée

L'évolution de la cryosphère reste difficile à préciser.

Pour la deuxième fois, des glaciologues du monde entier font le point dans une série d'articles sur ce que l'on peut dire aujourd'hui de la fonte des calottes groenlandaise et antarctique, qui représentent 99 % de la glace terrestre. Nicolas Jourdain, qui a participé à ces travaux, nous explique leur démarche.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

NICOLAS JOURDAIN
glaciologue au CNRS
et à l'Institut
des géosciences
de l'environnement,
à Grenoble

La collaboration de glaciologues dont vous faites partie travaille-t-elle pour le Giec, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ?

Pas directement. Nous inscrivons notre travail dans le cadre du projet d'intercomparaison des modèles d'inlandsis, connu en anglais sous le sigle ISMIP (*Ice sheet model intercomparison project*). Ultérieurement, le Giec fera une analyse critique des prédictions de l'ISMIP.

Qu'est-ce qu'une intercomparaison ?

Les glaciologues modélisent les calottes polaires par diverses approches, qui sont différentes car nous ignorons encore beaucoup des processus de fonte à l'œuvre. Dans l'ISMIP, nous utilisons des approches multiples pour établir une fourchette de prédictions. Les chercheurs de deux grands laboratoires français de glaciologie – l'IGE à Grenoble et le LSCE près de Paris – ont contribué à plusieurs articles, dont deux synthétisent les prédictions pour 2100.

Quelles sont ces prédictions ?

Au Groenland, le comportement de la calotte dépend surtout du réchauffement de l'atmosphère lié aux émissions de gaz à effet de serre. Dans le scénario bas, celui où l'humanité parviendrait à faire des efforts drastiques de réduction d'émission d'ici à la fin du siècle, nous prévoyons une hausse du niveau marin due aux calottes groenlandaises comprise entre 1,5 et 4,5 centimètres ; dans le scénario haut, avec beaucoup d'émissions, nous arrivons à une élévation comprise entre 4 et 14 centimètres. Quant à la contribution de la calotte antarctique, elle dépend à la fois de l'accélération de l'écoulement des glaciers et des précipitations qui augmentent dans une atmosphère plus chaude, donc plus humide. Ces effets

contraires expliquent que la fourchette encadrant la contribution plausible de l'Antarctique à la hausse du niveau de la mer est large : de – 7,8 centimètres à + 30 centimètres d'ici à la fin du siècle !

Pourquoi une incertitude aussi grande ?

Parce que nous devons tenir compte de ce que nous ne comprenons pas bien : en Antarctique, les glaciers se prolongent sur la mer en y flottant. Exactement comme dans le cas d'un glaçon dans un verre d'eau, si elles fondent, ces parties flottantes ne feront pas directement monter le niveau de la mer. Cependant, sans elles, l'écoulement des glaciers ne serait plus freiné, et plus de glace arriverait dans la mer. Nous ne savons pas bien quelle quantité, car nous ignorons à quelle vitesse les glaciers s'écouleraient si ces parties flottantes se réduisaient. Nous avons donc fait une expérience, qui est l'objet de l'un de nos articles : nous avons simulé dans nos modèles la disparition complète des parties flottantes, puis évalué l'élévation de l'océan mondial qui en résulterait. Cette hausse serait comprise entre 1 et 8 mètres au bout de 200 ans. Mais il ne s'agit là que d'un exercice de pensée, car les glaciers flottants ne vont pas disparaître du jour au lendemain.

La question de leur fonte est donc cruciale pour déterminer l'élévation de la mer ?

Exactement. C'est pourquoi nous avons fait le point là-dessus dans l'un des articles. Le point crucial est la pénétration de l'eau océanique chaude sous les glaciers flottants. L'intercomparaison nous fait comprendre qu'une priorité est de préciser comment les parties flottantes des glaciers antarctiques fondent. Afin d'en savoir plus, plusieurs équipes internationales envoient sous la glace des robots instrumentés. Avec les résultats de leurs observations, on espère mieux comprendre la fonte des glaciers par l'océan. ■

The Cryosphere, numéro spécial, 17 septembre 2020 (<https://bit.ly/3n6Tzel>)

GÉOSCIENCES

SOUS DES VOLCANS EFFUSIFS, UN ÉTONNANT MAGMA

Deux volcans effusifs des Galápagos recèlent dans leurs profondeurs un magma hétérogène, bien plus dangereux que la lave homogène qu'ils rejettent à la surface.

Tous les volcans ne sont pas de monstrueux cracheurs de nuées violentes et destructrices tels que le furent autrefois le Vésuve ou le Krakatoa. Certains, comme le Kilauea, à Hawaï, ou le piton de la Fournaise, à la Réunion, sont plutôt des forces tranquilles aux flancs émaillés de rivières de lave basique. Celle-ci étant peu riche en silice et donc fluide, les gaz s'en échappent facilement, ce qui évite le caractère explosif des laves visqueuses. Elle s'écoule à une vitesse qui dépend de sa fluidité et du relief. Les éruptions de ce type, dites « effusives », présentent rarement un danger mortel pour les populations, même si elles peuvent occasionner de sérieux dégâts sur les infrastructures. Une équipe internationale de chercheurs, dirigée par Michael Stock, du Trinity College, à Dublin, s'est demandé pourquoi ces titans géologiques produisent uniquement des éruptions effusives depuis des millions d'années. Cette stabilité serait liée à une homogénéité du système magmatique sous-jacent. Or en étudiant la lave basaltique des volcans Wolf et Fernandina, des îles Galápagos, les chercheurs ont découvert que les entrailles de ces montagnes cachent une composition magmatique qui n'est pas si homogène et qui se rapproche de celle des volcans explosifs, bien plus dangereux.

Pour comprendre la cause de la monotonie éruptive de ces volcans, les chercheurs ont analysé la composition des cristaux présents, entre autres, dans la lave rejetée. Puis, à l'aide d'un modèle thermodynamique, ils ont déterminé la nature du milieu au sein duquel ces cristaux se sont formés, à savoir la composition des magmas stockés sous terre. Étonnamment, cette composition s'est révélée beaucoup plus hétérogène et variée que celle des laves basiques émises à la surface par Wolf et Fernandina. Elle se rapproche notamment de la composition du magma acide (et donc visqueux, ce qui les rend explosifs) rejeté par le volcan explosif Saint Helens, aux États-Unis, dont l'éruption de 1980 fit 57 morts.

Alors pourquoi ces géants des Galápagos demeurent-ils tranquilles ? Il se pourrait qu'on le doive à la proximité de ces volcans avec des



L'éruption en 2015 du volcan effusif Wolf, sur l'archipel des Galápagos.

« points chauds » de magma montant des profondeurs de la Terre jusqu'à la surface. La quantité de magma transitant par la structure géologique serait si élevée qu'elle « étoufferait » toute potentielle diversité chimique, ce qui expliquerait la composition homogène retrouvée lors des éruptions. Cette hypothèse reste à confirmer ; et, surtout, il faudrait s'assurer que cette conclusion se généralise à tous les volcans effusifs.

La découverte de ces magmas hétérogènes amène à se demander s'ils ne pourraient pas remonter un jour à la surface et provoquer une éruption explosive. Ces volcans étant restés stables pendant des millénaires, il semble peu probable que les choses changent subitement. Le véritable risque d'éruption explosive, concernant ces colosses multiséculaires, serait déterminé par la présence d'eau dans le système (on parle alors d'explosion hydromagmatique) ou par l'arrivée d'un magma riche en dioxyde de carbone. Iguanes, cormorans et tortues géantes peuvent donc encore dormir sur leurs deux oreilles. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

M. J. Stock et al., *Nature Communications*, vol. 11, article 3767, 2020