

Anniversaire

Dossier

Apollo 11

1969 - 2019

CLIMATOLOGIE

LA PÊCHE AUX
CRÊPES DE GLACE
DE L'ANTARCTIQUE

BIOLOGIE

CONFLITS
SEXUELS CHEZ
LES DYTQUESJUILLET 2019
N° 501

La foule en équations

Des manifestations aux réseaux sociaux



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

COMPRENDRE LES FOULES... POUR LES PROTÉGER!



Quand vous marchez sur le trottoir et que vous devez éviter la collision avec des piétons venant en sens inverse, avez-vous tendance à dévier vers la droite ou vers la gauche? Dans un groupe dense en mouvement, des individus plus rapides que les autres accélèrent-ils ou freinent-ils l'ensemble?

Comment concevoir les issues de secours d'une salle de spectacle pour que celle-ci puisse être évacuée au plus vite? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles s'intéresse la science des foules, et *Pour la Science* vous propose à la une de ce numéro deux articles pour vous initier à ce domaine de recherche pluridisciplinaire et en plein essor (voir pages 26 à 39).

L'intérêt de comprendre le comportement d'une foule n'est pas qu'académique, loin de là. Les mouvements d'une assemblée dense d'individus conduisent parfois à des événements dramatiques, comme cela fut le cas en 2015 au pèlerinage de La Mecque, où une bousculade fit près de 2500 morts. Or modéliser de façon fiable les mouvements de foule est impératif pour éviter de telles catastrophes ou les atténuer.

Par ailleurs, une foule ne se manifeste pas forcément par des mouvements: elle peut présenter des phénomènes de contagion, et c'est ce qui se produit par exemple avec les «réseaux sociaux» (mais asociaux par certains aspects...) où, bien souvent, les fausses nouvelles se propagent davantage et plus vite que les vraies.

La compréhension des foules aide à protéger leur intégrité physique, et devrait aider à protéger leur intégrité mentale. Reste que le savoir acquis sur les comportements de masse peut, comme tout savoir, servir aussi des causes beaucoup moins nobles... en tombant dans les mains d'une grande entreprise, d'une secte, d'une agence de publicité, d'un parti politique ou d'un État autoritaire, comme la Chine, qui organise une surveillance de masse par reconnaissance faciale. Si les foules en prennent conscience, peut-être modifieront-elles leur attitude de façon à contrecarrer les mainmises délétères? ■

SOMMAIRE

N° 501 /
Juillet 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Le génome d'*Escherichia coli* complètement recodé
- Un trésor bourguignon de la fin du xv^e siècle
- Comment Pluton préserve un océan liquide
- L'origine des structures rayonnées d'impact
- Des éléments mobiles de notre génome pris sur le vif
- Supernoir: l'atout séduction des araignées-paons
- Explosion en jets des premières étoiles?
- L'hypothèse de Riemann vacille mais ne tombe pas

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Exigence stimulante ou excessive

Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Tentative d'épuisement d'un risque

Virginie Tournay

GRANDS FORMATS

DOSSIER – LES 50 ANS D'APOLLO 11

Le 21 juillet 1969 à 2h56 (heure française), des hommes ont foulé pour la première fois le sol de la Lune.

Retour sur le programme *Apollo* et ses succès, et aperçu des projets actuels.



P. 40

PORTFOLIO

UN PETIT PAS QUI A 50 ANS

Clara Moskowitz

L'exploit de la mission *Apollo 11* en quelques images.



P. 52

CONQUÊTE SPATIALE

LA RUÉE VERS LA LUNE

Adam Mann

Une nouvelle course vers notre satellite naturel est sur le point de commencer.



P. 46

CONQUÊTE SPATIALE

SUR LES TRACES D'APOLLO 11

Edward Bell

Un nouvel aperçu de la mission *Apollo 11* grâce à des images satellites et des modélisations 3D récentes.



P. 58

PLANÉTOLOGIE

LE PRÉCIEUX BUTIN D'APOLLO

Erica Jawin

L'étude des roches lunaires a radicalement renouvelé la planétologie.

P. 50

INFOGRAPHIE

OBJECTIFS LUNE

Parmi les 122 missions qui ont visé la Lune, à peine plus de la moitié ont atteint leur objectif.



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



En couverture :

© Shutterstock.com/adike

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



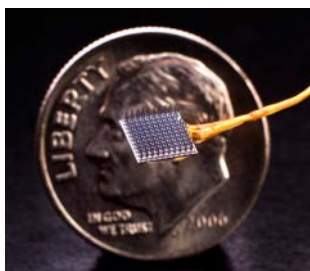
P.66

CLIMATOLOGIE

LA PÊCHE À LA CRÊPE DE GLACE

Fleurianne Bertrand
et Tim Ricken

Dans l'océan Antarctique, des chercheurs sont partis «pêcher» des crêpes de glace. Leur objectif: mesurer leurs propriétés pour les intégrer de façon plus réaliste dans les modèles climatiques.



P.72

NEUROSCIENCES

QUAND LES MACHINES DÉCODENT NOS INTENTIONS

Richard Andersen

Piloter une prothèse à la seule force de la pensée: c'est ce que permet un implant fiché dans la zone du cerveau qui crée nos intentions.

À LA UNE

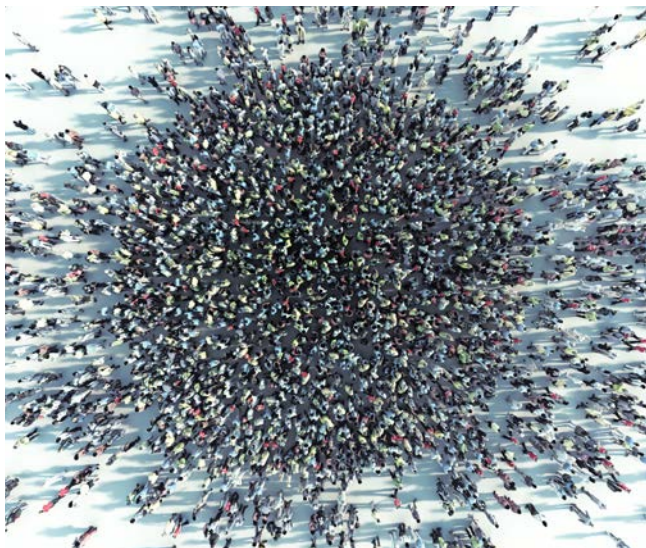
P.26

PSYCHOLOGIE

« MOINS LA FOULE EST DENSE, PLUS ELLE EST IMPRÉVISIBLE »

Entretien avec Mehdi Moussaïd

Comment organiser les zones urbaines pour que le trafic y soit fluide? Comment éviter les bousculades meurtrières lors de rassemblements? Comment lutter contre la propagation des fausses informations? Toutes ces questions sont au cœur d'une jeune discipline, l'étude des foules, qui commence déjà à fournir des réponses.



P.32

MATHÉMATIQUES

LA FOULE EN ÉQUATIONS

Bertrand Maury et Sylvain Faure

Imaginez que chaque individu d'une foule soit un pion sur un échiquier, ou encore que la foule soit une goutte qui dévale une montagne le plus vite possible. En s'appuyant sur de telles analogies, des physiciens et mathématiciens ont conçu des modèles de foules performants pour décrire l'évacuation d'un bâtiment ou le transit de passagers dans une gare.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

DES TROUS À ENTOURER AVEC PARCIMONIE

Jean-Paul Delahaye

Laisser des trous dans un assemblage de carrés en minimisant le nombre de pièces utilisées: ce problème de géométrie n'est pas facile. Mais le cheminement vers sa solution illustre bien la démarche des mathématiciens.



P.86

ART & SCIENCE

Des bulles et des cellules

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Le mystère des pierres qui bougent

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Les dytiques mâles ne manquent pas d'air

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Les neuf goûts du canard laqué

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P. 6 Échos des labos

P. 18 Livres du mois

P. 20 Agenda

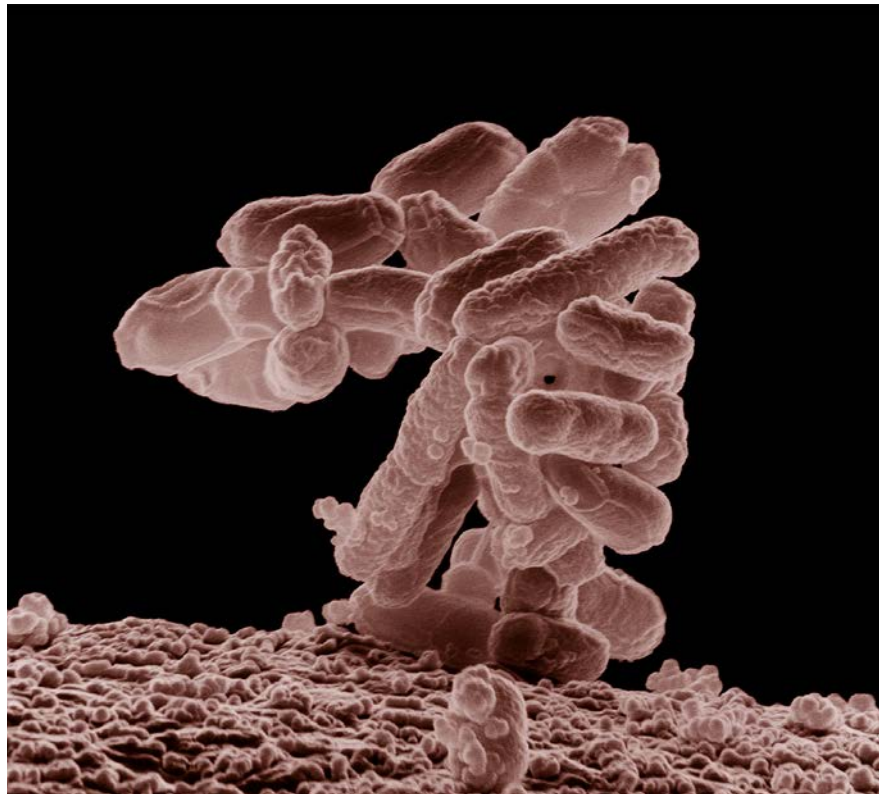
P. 22 *Homo sapiens informaticus*

P. 24 Questions de confiance

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE

LE GÉNOME D'ESCHERICHIA COLI COMPLÈTEMENT RECODÉ

La bactérie *Escherichia coli* (ci-contre, un amas de ces microorganismes vu au microscope électronique) est très commune dans la flore intestinale de l'humain. L'étude de son ADN permet de mieux comprendre les mécanismes génétiques.



Pour supprimer des redondances dans le code génétique de la bactérie *Escherichia coli*, des chercheurs l'ont entièrement recodé. Et la souche produite est viable.

La biologie de synthèse est un domaine de recherche en plein essor. Afin de mieux comprendre les mécanismes génétiques et les lois du vivant, les scientifiques modifient de diverses façons l'ADN. En 2016, l'équipe de l'entrepreneur californien Craig Venter, spécialisé dans les biotechnologies, a synthétisé une cellule artificielle capable de se répliquer avec un nombre minimal de gènes: elle n'en comptait que 473, à comparer par exemple aux quelque 20 000 du génome humain. Par des approches similaires de suppression de gènes, d'autres

chercheurs ont réussi à réduire le génome de la bactérie *Escherichia coli* de près de 15%. Jason Chin, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont adopté une autre approche. Ils ont cherché non pas à réduire la taille du génome d'*E. coli*, mais à remplacer certaines redondances du code génétique.

Cette tâche ambitieuse a été rendue possible grâce au développement récent de techniques de synthèse et d'assemblage de l'ADN. Cette molécule, avec sa structure en double hélice, est constituée d'une succession de bases azotées de quatre types: adénine (A), thymine (T), guanine (G) et

cytosine (C). Certaines de ces séquences, contenant parfois plusieurs milliers de bases, définissent des gènes dont la transcription permet la synthèse de protéines. Ces dernières sont composées d'une suite d'acides aminés, chacun étant codé par un triplet de bases dans l'ADN, un «codon». Par exemple, le triplet TCG code la sérine. Il existe des centaines d'acides aminés, mais les organismes vivants n'en utilisent que 20. Dès lors, 20 codons devraient suffire, mais le génome utilise tous les $4^3=64$ codons possibles: 61 d'entre eux codent des acides aminés et 3 servent de codons stop qui indiquent quand se termine un gène. Il y a donc redondance, plusieurs codons étant associés au même acide aminé (par exemple, la sérine est associée à 6 codons différents). On parle alors de «code dégénéré».

En 2013, afin d'étudier ces redondances, une équipe a supprimé un codon stop du génome d'*E. coli*. et l'a remplacé systématiquement par un codon équivalent. Mais cela n'avait un impact que sur un nombre limité (321) de codons dans l'ADN de la bactérie. Jason Chin et son équipe ont procédé à des modifications plus importantes. Ils ont remplacé deux codons de la sérine et un codon stop par des synonymes. Cela a impliqué de modifier pas moins de 18214 triplets de bases.

Le nouvel ADN a été conçu sur ordinateur et synthétisé par des processus chimiques bien maîtrisés. La difficulté rencontrée par les chercheurs venait de la taille du génome de la bactérie, qui comprend 4 millions de paires de bases. Comme il ne peut être synthétisé en une fois, les chercheurs ont dû produire des fragments de 100 000 bases, qui étaient injectés au fur et à mesure dans le génome d'*E. coli*. Ils ont finalement obtenu une lignée de bactéries au génome complètement recodé. Nommée *Syn61*, cette lignée est viable, mais ses membres se reproduisent plus lentement que leurs consœurs. En outre, les images au microscope indiquent que les bactéries *Syn61* sont légèrement plus longues.

La biologie de synthèse étant une discipline qui progresse vite, le record établi par l'équipe de Jason Chin ne tiendra pas très longtemps. Un consortium international achèvera bientôt la synthèse du génome complet de la levure *Saccharomyces cerevisiae*, soit 12 millions de paires de bases. Et la constitution d'un génome d'*E. coli* utilisant seulement 57 codons est aussi en cours.

Par ailleurs, le fait de réduire les redondances sur les codons présente un intérêt majeur. Il est alors possible de réaffecter un codon non utilisé et, par des opérations de génie génétique, lui faire correspondre un acide aminé que ne produisent pas les organismes vivants. Ce qui pourrait donner des protéines de synthèse aux fonctions nouvelles.

À terme, l'un des objectifs est de fabriquer des organismes spécialement conçus, par exemple, pour produire certains composés : des sortes de micro-usines sur mesure, à l'image des souches génétiquement modifiées d'*E. coli* qui produisent l'insuline humaine à destination des diabétiques. ■

SEAN BAILLY

J. Fredens et al., *Nature*, en ligne le 15 mai 2019

Un trésor bourguignon de la fin du xv^e siècle

Au sein du Dijon médiéval, la mise au jour d'un trésor monétaire témoigne des nombreux échanges de la puissante Bourgogne de la fin du xv^e siècle. L'archéologue Stéphane Alix, coauteur de la découverte, nous en dit plus.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

STÉPHANE ALIX,
archéologue
à l'Institut national de
recherche archéologique
préventive (Inrap)

Comment avez-vous découvert ce trésor monétaire ?

Nous étions en train d'effectuer le diagnostic archéologique préalable à des travaux, imposé par la loi, dans le secteur de Saint-Bégnigne au sein du Dijon médiéval. Dans les couches de la fin du Moyen Âge, nous avons trouvé les restes d'une petite boîte en bronze détériorée par les constructions modernes. Elle contenait des monnaies d'or et d'argent.

Combien exactement ?

Trente-quatre, mais la plupart de ces monnaies étaient collées les unes aux autres par la corrosion. Nous avons donc dû envoyer le tout au Centre de restauration et d'études archéologiques municipales de Vienne (dans le Rhône) pour que des restaurateurs les séparent et les nettoient afin de les rendre lisibles.

Et, dès lors, qu'a-t-on identifié ?

Le trésor contenait des monnaies des Sforza, la famille régnante de Milan, des monnaies de Ferrare, du Pape, des monnaies anglaises, de certaines

principautés du Saint-Empire germanique et d'autres, très rares, d'un évêché suisse... Ces pièces livrent un témoignage rare d'un point de vue numismatique sur la circulation des monnaies de valeur entre la Bourgogne de la fin du xv^e siècle et toute une série d'États européens. La remarquable qualité des pièces démontre la volonté de prestige des personnalités qui les dirigeaient, et leur diversité illustre les échanges internationaux entre les puissances de l'époque et l'influent duché de Bourgogne, qui, rappelons-le, s'étendait à l'époque de la région de Genève aux Pays-Bas.

Peut-on présumer que ces monnaies appartenaient à un marchand ?

Elles ont en tout cas été rassemblées par quelqu'un – petit aristocrate ou marchand – connecté à la sphère marchande « internationale ». Pour autant, il s'agit du pécule relativement modeste d'une personne privée, qui y a adjoint un bijou de famille – un médaillon de mariage constitué de deux lettres d'or émaillées verte et blanche (voir la photo ci-dessous) –, avant de le cacher dans le sol. Celui d'une maison probablement.

Ce trésor est-il d'une grande valeur ?

J'ignore tout de sa valeur pécuniaire, mais sa valeur numismatique est indéniablement très grande. Par ailleurs, si ma collègue Céline Capdeville et moi, qui sommes archéologues, avons apprécié de tomber sur des objets aussi beaux qu'intéressants, nous avons aussi été captivés par les niveaux inférieurs à celui qui contenait le trésor.

Pourquoi ?

Parce qu'on a mis au jour de très intéressants niveaux médiévaux plus anciens, dont l'étude sera utile pour reconstituer l'histoire de Dijon, et, au-dessous de ces couches, un cimetière gallo-romain de la fin de l'Antiquité que les historiens et archéologues soupçonnaient depuis longtemps, sans jamais avoir pu prouver son existence. C'est chose faite désormais. ■



PLANÉTOLOGIE

COMMENT PLUTON PRÉSERVE UN OCÉAN LIQUIDE

Pluton présenterait un océan souterrain d'eau liquide. Mais pourquoi celui-ci n'a-t-il pas gelé ? Une couche isolante formée d'hydrates de méthane expliquerait sa persistance.

Sur Pluton, lointaine planète naine située aux confins du Système solaire, la température moyenne de surface est de -229°C . L'eau y est donc présente surtout sous forme de glace. Et pourtant, elle abriterait un océan liquide sous sa surface ! Cette hypothèse découle de l'observation d'un excès local de masse identifié grâce à des anomalies gravitationnelles mesurées par la sonde *New Horizons* lors de son passage près de la planète naine en 2015. La même méthode suggère aussi que des océans souterrains existent sur certains satellites glacés de Jupiter et Saturne, comme Europe ou Encelade. Pour ces derniers, les planétologues ont proposé des mécanismes qui expliquent comment ces océans n'ont pas gelé, mais ils ne s'appliquent pas au cas de Pluton. Pour cette planète naine, Shunichi Kamata, de l'université de Hokkaido, au Japon, et Francis Nimmo, de l'université de Californie à Santa Cruz, ont proposé un autre scénario.

Dans le cas d'Europe ou Encelade, ces lunes englacées sont soumises à d'intenses forces de marée exercées par la planète géante proche, respectivement Jupiter et Saturne. Ces forces provoquent des frictions au sein des lunes gelées, d'où un dégagement de chaleur. Cette dernière, avec la chaleur émise par la radioactivité, reste ensuite piégée sous la croûte de glace et maintient liquide l'eau des océans souterrains.

Pluton n'est pas le satellite d'une planète géante. Par conséquent, elle n'est pas soumise à des forces de marée aussi intenses. Elle a de plus une couche de glace trop mince pour retenir suffisamment la chaleur. Un scénario possible suppose une forte concentration d'ammoniac dans l'océan, qui abaisse alors la température de solidification de l'eau. Cependant, cette théorie est difficile à défendre en l'absence d'indices de la présence d'ammoniac sur Pluton.

Shunichi Kamata et ses collègues proposent un autre scénario. Ils ont supposé qu'il existe entre l'océan et la croûte de glace une couche solide, formée de clathrates de méthane. Les clathrates de méthane (ou hydrates de méthane) sont composés de glace d'eau dans laquelle est piégé du méthane gazeux : les molécules d'eau forment des nanocages où se niche le méthane. Or ces hydrates conduisent 5 à 10 fois moins



Sur Pluton, l'anomalie gravitationnelle associée à la région de Sputnik Planitia suggère que la croûte de surface cache un océan d'eau liquide.

bien la chaleur que la glace d'eau et sont 10 fois plus visqueux. Cette couche isolante limiterait les pertes de chaleur de l'intérieur de la planète naine, qui pourrait ainsi rester bien plus chaud que la croûte de glace en surface.

Mais d'où viendrait cette couche d'hydrates de méthane ? Elle se serait formée à partir de gaz, capturé en profondeur lors de la naissance de Pluton, ou produite à partir de la fragmentation de matière organique à plus de 150°C , température atteinte dans le cœur de la planète naine pendant une partie de son histoire. Le piégeage du méthane dans les hydrates explique aussi la faible proportion de ce gaz à la surface de Pluton, par comparaison à ce qu'on observe sur d'autres planètes.

Les simulations effectuées par Shunichi Kamata et son équipe ont montré qu'en l'absence d'une couche d'hydrates l'océan aurait gelé en 3,8 milliards d'années, alors qu'avec une telle couche, il resterait liquide après 4,5 milliards d'années (l'âge du Système solaire). Si ce scénario est le bon, et au vu de l'abondance du méthane dans l'Univers, on peut penser qu'il existe un grand nombre d'océans cachés partout dans le cosmos ! ■

IZIA PÉTILLON

S. Kamata et al., *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 407-410, 2019