

SCIENCE

PHYSIQUE
**DOMPTER
LES PHOTONS GRÂCE
À LA TOPOLOGIE**

MATHÉMATIQUES
**LES INTRIGANTS
CHEMINS DE LA
FOURMI DE LANGTON**

MISSION GAIA
**LA VOIE LACTÉE
CARTOGRAPHIÉE
EN 3D**

AGRICULTURE
BIODIVERSITÉ

LA FIN DES INSECTES ?

Les chiffres d'une catastrophe annoncée





Pie grièche écorcheur



Leucorrhine à gros thorax



Abeille butinant une fleur de cognassier



Sabot de Vénus

BIODIVERSITÉ : AGIR AUJOURD'HUI POUR DEMAIN

Massifs du Jura, des Vosges, du Morvan, forêts milieux humides et aquatiques comme les marais tufeux et les tourbières... Cette biodiversité fournit des ressources indispensables à notre quotidien, elle fait la beauté et le caractère de la Bourgogne-Franche-Comté. C'est pourquoi la Région mène une démarche volontariste pour sa préservation.

Connaitre pour protéger

La Région est partie prenante dans l'observatoire régional de la biodiversité qui étudie l'état et l'évolution de la biodiversité. Elle soutient aussi financièrement les associations naturalistes dont les observations de terrain alimentent l'observatoire, tel que, le conservatoire botanique national de Franche-Comté - Observatoire régional des invertébrés pour ses actions d'inventaire de la flore et des insectes.

Conserver les espaces et les espèces

La Bourgogne-Franche-Comté compte 18 réserves naturelles régionales, allant des pelouses sèches aux tourbières, des forêts aux prairies et aux grottes à chiroptères. La Région s'engage, aux côtés des gestionnaires, pour protéger ces milieux remarquables. Elle porte des appels à projets notamment pour la sauvegarde des bocages et vergers et soutient aussi des associations de sauvegarde telle qu'Athénas, qui protège le lynx boréal.

Impliquer et transmettre

La protection de la biodiversité est notre affaire à tous, la Région en est convaincue. Elle a ainsi lancé une grande concertation qui a déjà recueilli 2000 contributions. Il n'y a pas d'âge pour s'impliquer ! Les classes environnement, proposées aux écoles par la Région, permettent d'éduquer à la nature et à l'environnement environ 7 000 élèves par an.

Une agence régionale de la biodiversité

Créée en juin 2019 et basée à Besançon, capitale française de la biodiversité, cette Agence (régionale de la biodiversité) sera un précieux outil pour renforcer les liens entre naturalistes, acteurs économiques, chercheurs, citoyens. L'agence proposera de nouveaux modèles et services pour rendre les politiques d'intervention plus cohérentes et efficaces et faire de la biodiversité une source de développement économique et de création d'emplois.



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

ADIEU BUPRESTE, SYRPHE, BOURDON, ÆSCHNE...

Tous les entomologistes, qu'ils soient amateurs ou professionnels, vous le diront: on voit de nos jours moins d'insectes dans les campagnes qu'il y a, mettons, vingt ou trente ans. Et le « syndrome du pare-brise » devient célèbre: on fait aujourd'hui de longs trajets sur autoroute sans avoir, en saison, à s'arrêter régulièrement pour nettoyer le pare-brise maculé par les collisions avec les insectes volants. Mais au-delà des nombreux témoignages personnels, le déclin des populations d'insectes est-il étayé scientifiquement?

Il n'y a pas encore de réponse simple à cette question, pour diverses raisons. Les études sur l'évolution de l'abondance entomologique sont difficiles, peu nombreuses et portent sur des groupes particuliers d'insectes, qui plus est dans des régions limitées. Reste qu'un faisceau d'indices tend à montrer que l'on assiste bel et bien à une baisse rapide des populations d'insectes, un peu partout dans le monde.

Parmi ces indices, le plus frappant et le plus médiatisé est l'étude dite de Krefeld, publiée en 2017 et selon laquelle la masse d'insectes volants a diminué de plus de 75% en moins de trente ans dans les réserves naturelles de l'ouest de l'Allemagne (voir l'article de Josef Settele, pages 26 à 34). D'autres études de ce genre sont à mener pour préciser ou nuancer le tableau, mais celui-ci reste fort inquiétant, notamment pour le futur de l'agriculture étant donné le rôle des insectes pollinisateurs dans la production végétale (voir l'entretien avec Jean-François Silvain, pages 36 à 39).

Si déclin rapide des insectes il y a, quelles sont ses causes? Là encore, les études quantitatives restent insuffisantes, mais les suspects sont nombreux et évidents: disparition ou fragmentation des habitats, étalement urbain, artificialisation des berges, assèchement des zones humides, pollution, pesticides, agriculture intensive... Y remédier est possible, mais impliquerait, comme pour la question du climat, des changements profonds qui heurteraient des intérêts particuliers. À n'en pas douter, cela fera naître des bataillons d'entomoscéptiques. ■

SOMMAIRE

N° 503 /
Septembre 2019

ACTUALITÉS

P.6

ECHOS DES LABOS

- Un très vieux crâne grec présumé *sapiens*
- A Mayotte, un volcan vient de naître
- Le chasse-neige des anneaux de Saturne
- Des arbres contre le réchauffement
- Le plus ancien homicide européen
- Massages à l'acide et aux mandibules
- 'Oumuamua : pas d'extraterrestres
- Le poisson-zèbre dort comme nous
- Un traitement supprime le virus du sida chez la souris
- L'origine de la collerette du dragon

P.18

LES LIVRES DU MOIS

P.20

AGENDA

P.22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

De l'intérêt d'enseigner par projets
Gilles Dowek

P.24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Comment défendre la science ?

Virginie Tournay



En couverture :
© iStock/dtimiraos

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



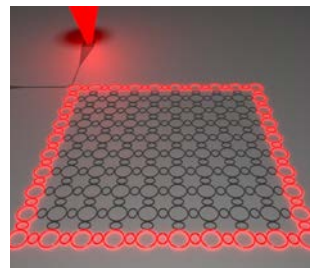
P.40

ASTRONOMIE

LA PREMIÈRE CARTE 3D DE LA VOIE LACTÉE

Carme Jordi et Eduard Masana

Plus de 1,3 milliard d'étoiles de notre galaxie cartographiées avec une précision inédite : ce catalogue dressé par la mission spatiale européenne *Gaia* transforme la vision et la compréhension que nous avons de notre environnement cosmique.



P.60

PHYSIQUE

DOMPTER LES PROTONS GRÂCE À LA TOPOLOGIE

Olivier Bleu, Dmitry Solmyshkov et Guillaume Malpuech

Les performances des techniques de communication fondées sur des systèmes optiques plafonnent. Mais un domaine de recherche récent, la photonique topologique, ouvre la voie à un nouvel élan d'innovations.



P.50

CLIMATOLOGIE

LE JET-STREAM, AMPLIFICATEUR MÉTÉOROLOGIQUE

Michael E. Mann

Ce courant de vents violents qui circulent à haute altitude est parfois responsable dans nos latitudes d'événements météorologiques extrêmes. Selon certaines prévisions, le réchauffement climatique renforcera vers 2050 cette tendance.

2019

P.71

CAHIER PARTENAIRE

LA SCIENCE DOIT JOUER SON RÔLE POUR GARANTIR UN MONDE DURABLE

Entretien avec Jean-Paul Moatti, président-directeur général de l'Institut de recherche pour le développement (IRD).



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



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LA VOLTE-FACE DU PROFESSEUR ECCLES

Jean-Gaël Barbara

Pendant vingt ans, le neurophysiologiste australien John Eccles a défendu l'idée que les neurones communiquent par des courants électriques. Puis, soudainement, il invalida sa propre théorie et prouva que la communication est chimique. Un modèle de pensée autocritique...

À LA UNE

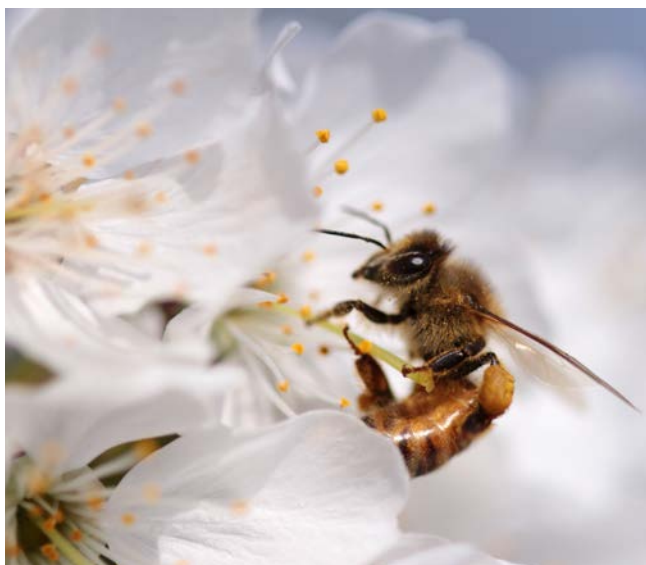
P.26

ÉCOLOGIE

LES INSECTES EN CHUTE LIBRE

Josef Settele

Les populations d'insectes s'effondrent, même dans les réserves naturelles, révèle une étude réalisée en Allemagne. Un constat alarmant, qui semble valable pour bien d'autres régions dans le monde.



P.36

ÉCOLOGIE

« 35 % DE NOS RÉCOLTES DÉPENDENT DES POLLINISATEURS »

Entretien avec Jean-François Silvain

Visible par chacun, l'effondrement de grandes populations d'insectes menace le fonctionnement des écosystèmes et notre alimentation. Jean-François Silvain, le président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), commente ces enjeux.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

LES INTRIGANTS CHEMINS DE LA FOURMI DE LANGTON

Jean-Paul Delahaye

Elle va et vient et occupe petit à petit une zone infinie du plan: la fourmi automatique de Langton décrit des trajectoires dont la complexité ne livre que lentement ses secrets.



P.86

ART & SCIENCE
L'ASSASSIN
ÉTAIT UN FICUS

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE
COUP DE CHALEUR
SUR LE CAOUTCHOUC

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION
QUAND LES PLANTES
GRAVISSENT
LES MONTAGNES

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE
JUTOSITÉ
ET TENDRETÉ

Hervé This

P.98

A PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Agenda

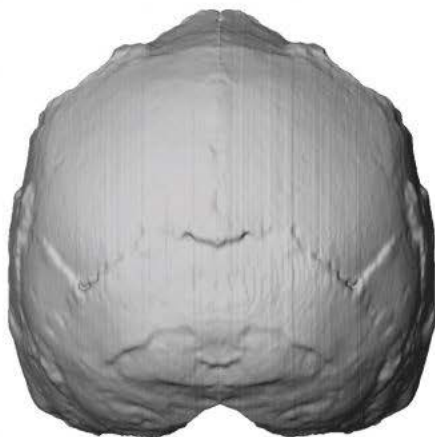
P.22 *Homo sapiens informaticus*

P.24 Questions de confiance

PALÉOANTHROPOLOGIE

UN TRÈS VIEUX CRÂNE GREC PRÉSUMÉ SAPIENS

Des chercheurs affirment qu'un crâne découvert dans la grotte d'Apidima, en Grèce, est celui d'un *Homo sapiens* vieux de 210 000 ans. Mais ce résultat soulève des doutes.



A la fin des années 1970, Théodore Pitsios, médecin et amateur de préhistoire, découvrait deux crânes humains fossiles dans la grotte d'Apidima, en Laconie (Péloponnèse). Deux groupes de chercheurs viennent d'en publier de nouvelles analyses, qui sont contradictoires.

Selon la première équipe, celle de Marie-Antoinette de Lumley, directrice de recherche émérite au CNRS, les deux crânes sont ceux de pré-Néandertaliens de même âge, puisque trouvés ensemble : quelque 160 000 ans. Dirigée par Katerina Harvati, de l'université de Tübingen, la deuxième équipe a fait sensation : si, comme la première, elle attribue le crâne noté Apidima 2 à un pré-Néandertalien mort il y a quelque 170 000 ans, elle voit dans le crâne Apidima 1 un *Homo sapiens* archaïque, qui aurait vécu il y a quelque 210 000 ans.

Or aucun fossile *sapiens* de plus de 43 000 ans n'avait jamais été trouvé jusqu'à présent en Europe !

Reste que l'étude d'Apidima 1 est plus que délicate, car le fossile se limite à une demi-calotte crânienne postérieure gauche. L'équipe de Katerina Harvati conclut qu'il est *sapiens* sur la base d'une analyse morphométrique, c'est-à-dire d'une comparaison statistique des détails géométriques de deux zones de la surface d'Apidima 1 avec ceux des mêmes zones sur les calottes d'autres formes humaines (*Homo sapiens* anciens, Néandertaliens, humains des Paléolithiques moyens africain et européen). Il en ressort que les détails observés sur Apidima 1 sont plus proches de ceux des calottes des *H. sapiens* anciens que de ceux des calottes de toutes les autres formes humaines considérées. D'où la proposition de ces chercheurs : Apidima 1 est un *H. sapiens* archaïque.

A gauche, le scan 3D d'Apidima 1 ; au milieu, la reconstruction de la calotte complète par symétrisation ; à droite, le fossile encore lié à la matrice minérale dont il a été tiré.

Cette conclusion soulève de nombreux doutes chez les préhistoriens. L'un s'étonne par exemple qu'aucune comparaison n'ait été entreprise avec des crânes préneandertaliens européens de même époque, par exemple avec ceux vieux de 200 000 ans de la grotte de la Chaise, en Charente (abri Suard). Pour sa part, Silvana Condemi, du CNRS, ne croit pas que l'absence sur Apidima 1 d'un « chignon néandertalien » (une petite bosse nucale), soulignée par l'équipe de Katerina Harvati, soit significative : on ne le connaît en effet que sur des Néandertaliens plus tardifs. En revanche, elle note sur les scans d'Apidima 1 présentés par les chercheurs que « les insertions des muscles sur la nuque

ressemblent à celles des Néandertaliens; et que la largeur maximale du crâne est en position basse comme chez tous les Néandertaliens»; pour elle, il est clair que ce morceau de calotte ne suffira pas à établir un diagnostic précis d'espèce, et il lui semble plutôt préneandertalien.

Les datations d'Apidima 1 et 2 sont aussi problématiques. Pour commencer, les fossiles ont été trouvés à quelques centimètres l'un de l'autre au sein du remplissage détritique d'une fente soudée par une matrice minérale fine, donc en l'absence de contexte stratigraphique aidant à dater. Dès lors, l'estimation de leurs âges ne pouvait que reposer sur une méthode physique: la datation par l'uranium-thorium. Or l'application de cette technique s'est révélée difficile: les chercheurs ont écarté 19 des 25 points de mesure choisis, parce que trop douteux (en raison d'une vraisemblable migration d'uranium entre la matrice et le fossile); et les autres font varier l'âge minimal du fossile entre 50000 et 350000 ans. En fin de compte, l'âge de 210000 ans attribué à Apidima 1 est une moyenne entre des résultats hautement variables...

Par ailleurs, le statut problématique d'Apidima 1 n'est pas étonnant si l'on considère le cas d'un autre fossile grec: le crâne de Petralona. Depuis sa découverte, l'âge de ce fossile est controversé: le consensus est qu'il daterait de 200000 à 400000 ans. Or, a fait remarquer dans sa thèse le paléoanthropologue Gaspard Guipert, de l'université de Lyon, le crâne de Petralona est morphologiquement très proche de celui de Kabwe, en Zambie, vieux de 150000 à 300000 ans, et de celui de Bodo, en Éthiopie, âgé de 500000 à 600000 ans. Une constatation qui illustre les limites de l'analyse morphologique en l'absence, sur un fossile, de traits diagnostiques de l'espèce: que dit cette méthode en effet quand elle conduit à rapprocher des fossiles aussi dispersés dans le temps et dans l'espace que ceux de Kabwe et de Bodo? Et que dit-elle dans le cas d'une demi-calotte postérieure gauche, difficile à dater, péniblement tirée d'une gangue minérale, qui s'est sans doute mélangée avec elle et l'a déformée, et tout cela compte tenu de la variabilité existant toujours au sein d'une espèce? ■

FRANÇOIS SAVATIER

K. Harvati et al., *Nature*, vol. 571, pp. 500-504, 2019; M.-A. de Lumley (dir.), *Les restes humains anténeandertaliens Apidima 1 et Apidima 2*, CNRS Éditions, 2019

À Mayotte, un volcan vient de naître

Pour la première fois, des géologues ont observé « en direct » la formation d'un nouveau volcan, de 800 mètres de haut... mais à 3 500 mètres de profondeur au large de Mayotte. Stéphane Jorry, chercheur à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) et responsable de la mission, raconte cette découverte.



Propos recueillis par NICOLAS BUTOR

STÉPHAN JORRY
chercheur en
géosciences marines
à l'Ifremer, à Brest

En quoi la situation à Mayotte est-elle inédite ?

C'est une découverte scientifique unique. Mayotte n'était pas considérée comme une zone sismogène : le dernier séisme avait eu lieu dans les années 1990 et n'avait été que peu ressenti à terre. Puis plusieurs séismes se sont succédé depuis mai 2018. Cela a été terrible pour la population, des gens ont dormi dehors pendant des nuits... Nous sommes donc partis en campagne pour comprendre ce phénomène et éclairer la population mahoraise, la préfecture de Mayotte, et les ministères de la Transition écologique et solidaire et de l'Enseignement supérieur.

L'essentiel de la sismicité est aujourd'hui localisé à 5-15 kilomètres au large de l'île de Petite-Terre. Mais, lors de nos deux premières campagnes, Mayobs 1, en mai 2019, puis Mayobs 2, en juin, nous avons mis en évidence, en continuité avec la zone de sismicité, un volcan sous-marin à 50 kilomètres de l'île, sorti en une année ! Grâce aux données bathymétriques recueillies, nous avons calculé que 5 kilomètres cubes de lave ont été émis depuis juin 2018, soit environ 30 % de la production annuelle de magma sur l'ensemble des dorsales océaniques de la planète. C'est exceptionnel, même par rapport aux phénomènes éruptifs à terre.

À quel contexte géodynamique est associé ce volcan ?

Pour l'heure, il est difficile de répondre. Peut-être est-ce un point chaud, avec une chambre magmatique très profonde d'où remonte du magma ; ou une dorsale océanique, c'est-à-dire une limite de plaque. Plusieurs équipes travaillent sur le sujet. L'Ifremer étudie les éléments présents à l'état de traces dans les roches, et une équipe à l'université Clermont-Auvergne se penche sur la géochimie de ces laves, en coordination avec l'Institut de physique du globe de

Paris (IPGP). Nous avons aussi eu la surprise de collecter des roches riches en gaz sur le volcan actif. On souhaite y mesurer des éléments, comme la concentration en isotopes de l'hélium, qui renseigneront sur la profondeur de la source. Tous ces indices nous aideront à définir le contexte géodynamique.

Quels sont les objectifs des campagnes suivantes ?

Deux nouvelles campagnes, Mayobs 3 et 4, ont été organisées en juillet. Pour Mayobs 3, dirigée par Isabelle Thion, du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), il s'agissait de récupérer des sismomètres de fond de mer, qui avaient été déployés pendant Mayobs 2 pour aider à localiser les séismes, horizontalement et en profondeur. Et durant Mayobs 4, codirigée par Nathalie Feuillet, de l'IPGP, et Yves Fouquet, de l'Ifremer, les chercheurs ont utilisé Scampi, une caméra tractée près du fond par le navire, pour observer en direct l'activité magmatique et fluide, ainsi que la sonde CTD Rosette, qui piège de l'eau que nous pourrions analyser. Ils ont aussi utilisé de nouvelles dragues à roches pour compléter les échantillons. Enfin, à l'aide d'outils plus précis, ils ont affiné la connaissance de la structure du fond océanique, notamment de son évolution depuis juin.

Qu'espérez-vous apprendre ?

Aujourd'hui, aucun modèle n'explique ce phénomène ; nous allons donc en apprendre beaucoup en termes de géodynamique. De plus, l'événement volcanique au fond de la mer étant récent, nous allons pouvoir suivre la colonisation de ce nouveau relief par les organismes vivants. On peut aussi s'intéresser à l'influence des fluides du volcan, qui s'échappent sur deux kilomètres de haut, et de la zone de sismicité sur la composition chimique de l'océan... Pour l'instant, ce ne sont que des questions, mais les perspectives scientifiques sont immenses. ■

brgm.fr/actualite/seismes-mayotte-conclusions-seconde-campagne-oceanographique

ASTROPHYSIQUE

LE CHASSE-NEIGE DES ANNEAUX DE SATURNE

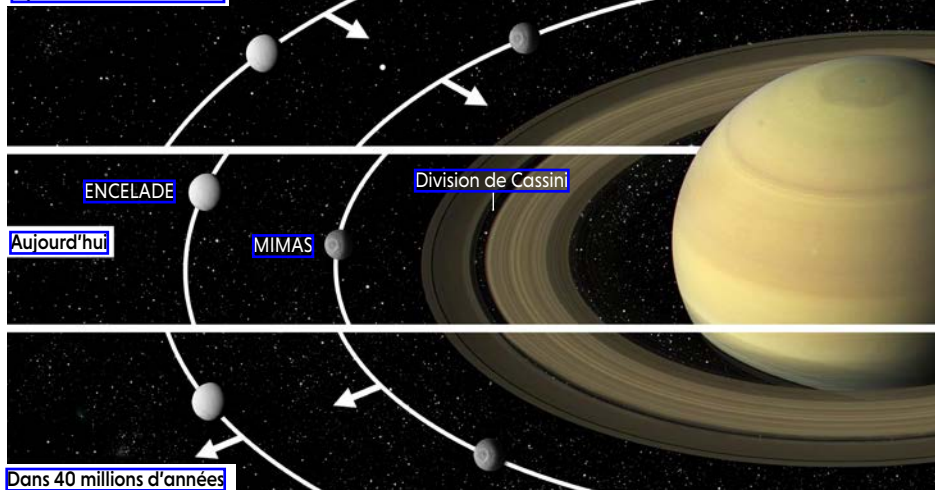
Mimas, satellite de Saturne, aurait déblayé à distance une région des anneaux de la planète géante et ainsi donné naissance à la division de Cassini.

En 2017, vingt ans après son lancement dans l'espace, la sonde *Cassini* se désintègre dans l'atmosphère de Saturne. Lors de sa descente, elle a évalué avec précision la masse des anneaux de Saturne, emblématiques de la planète, ce qui a conduit à une réestimation totale de leur âge. On les pensait formés en même temps que la planète et le Système solaire, il y a près de 4,5 milliards d'années, mais ils auraient en fait seulement 100 millions d'années. Cette découverte a remis en question la théorie de la formation de la division de Cassini, une bande sombre de très faible densité au regard des anneaux qui l'entourent. Kévin Baillié, de l'observatoire de Paris, Benoît Noyelles, de l'université de Franche-Comté, et leurs collègues ont alors proposé une nouvelle explication pour la naissance de cette structure.

Le scénario précédent supposait une résonance gravitationnelle entre le satellite Mimas et les corps situés dans la future division de Cassini. Ce phénomène est bien connu des astrophysiciens : lorsque des corps sont en orbite autour d'un même astre avec des périodes de révolution dont le rapport est un nombre entier (ou demi-entier), leur interaction est renforcée et peut perturber leur trajectoire. C'est le cas autour de Saturne où les particules de glace d'une zone des anneaux tournent avec une période précisément deux fois plus courte que Mimas.

Cependant, 100 millions d'années n'auraient pas été suffisantes pour former ainsi une telle structure de 4500 kilomètres de large. Les chercheurs ont alors proposé que Mimas se soit rapproché de Saturne dans le passé, entraînant à distance les particules des anneaux qui étaient en résonance avec lui. Leurs simulations hydrodynamiques montrent qu'une migration sur 10 millions d'années serait capable de balayer les particules présentes dans la division de Cassini, Mimas agissant comme un chasse-neige à distance ! Le satellite serait maintenant dans une seconde phase de migration, confirmée par les observations, qui l'éloigne de la géante gazeuse. Depuis que le satellite a entamé son éloignement, la division de Cassini commence à se

Il y a 10 millions d'années



Dans 40 millions d'années

En se rapprochant de Saturne, Mimas et Encelade ont déblayé à distance une région dans les anneaux de la planète, à l'origine de la division de Cassini. La migration des deux satellites s'est inversée, ils s'éloignent de Saturne. Privée de son chasse-neige, la division de Cassini se remplira de débris et devrait disparaître dans 40 millions d'années.

remplir à nouveau et devrait totalement se refermer dans 40 millions d'années.

On explique facilement l'éloignement actuel de Mimas : du fait des forces de marées entre celui-ci et Saturne, la vitesse de rotation de la planète diminue et, par conservation du moment cinétique total, le satellite s'en éloigne. On observe aussi ce phénomène avec la Lune, qui s'écarte d'environ quatre centimètres par an de la Terre. En revanche, comment expliquer la phase passée de rapprochement de Mimas ?

Dans le cas d'un satellite assez mou, les forces de marée chauffent celui-ci et il se rapproche de la planète. Problème : la forte activité thermique résultante aurait fondu et lissé la surface de Mimas, ce qui est incompatible avec les observations de nombreux cratères d'impact sur le satellite. Pour résoudre cette contradiction, Kévin Baillié, Benoît Noyelles et leurs collègues ont repris des idées similaires mais en impliquant deux satellites, Mimas et Encelade. En effet, si deux lunes sont en résonance, il est possible que l'échauffement de l'une entraîne la migration de l'autre. Mimas et Encelade auraient migré tous les deux et seul le second aurait chauffé. Ainsi, Mimas aurait bien agi comme un chasse-neige à distance sur les anneaux de Saturne ! ■

IZIA PÉTILLON

K. Baillié et al., *MNRAS*, vol. 486, pp. 2933-2946, 2019 ;
B. Noyelles et al., *ibid.*, pp. 2947-2963.

TRIO D'EXOPLANÈTES POUR TESS

Grâce à Tess, un satellite chasseur d'exoplanètes, Maximilian Günther, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues ont trouvé une superterre et deux minineptunes en orbite serrée autour de l'étoile TOI-270, située à seulement 73 années-lumière du Système solaire. La proximité de ces « voisins » et le fait que leur étoile soit plutôt calme offrent des conditions idéales pour mieux comprendre comment ces exoplanètes se forment et évoluent. Une cible parfaite pour le futur télescope spatial James-Webb.

UN OISEAU AU LONG DOIGT DANS L'AMBRE

C'est un attribut inédit : Lida Xing, de l'université de géosciences de Pékin, et ses collègues ont décrit un oiseau pourvu d'un doigt exceptionnellement long. Les chercheurs ont reconstitué le fossile d'*Elektorornis chenguangi*, piégé dans l'ambre et vieux de 99 millions d'années, grâce à la microtomographie à rayons X. Le troisième doigt de sa patte mesure 9,8 millimètres, soit plus que la partie inférieure de sa patte ! Il aurait utilisé ce doigt pour extraire de la nourriture de troncs d'arbres.

ALLERGIE : SOLUTION INEFFECTIVE

Pour les bébés dont un parent présente une allergie alimentaire et qui ne sont pas exclusivement allaités, on recommande des préparations hypoallergéniques (les protéines y sont fragmentées par chauffage). Cette alimentation éviterait à l'enfant de développer des allergies plus tard. Est-ce efficace ? Des chercheurs de l'Inra et de l'Inserm ont suivi 15 000 enfants pendant deux ans. Ils n'ont observé aucun effet protecteur, et même constaté une hausse des cas d'allergies plus tard.

DES ARBRES CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT

Les plantes croissent en utilisant du dioxyde de carbone (CO_2), l'un des gaz à effet de serre de l'atmosphère. Ainsi, les arbres piègent du carbone et contribuent à atténuer le réchauffement de la planète. Mais quelle surface pourrait-on reboiser concrètement et pour quel effet ? Pour le savoir, Jean-François Bastin, de l'école polytechnique fédérale de Zurich, et ses collègues ont étudié l'influence du climat, de la topographie et de la nature du sol sur la répartition des arbres pour établir une carte prédictive du couvert végétal à l'échelle globale. Grâce à cette approche, ils ont estimé que 900 millions d'hectares seraient disponibles pour la reforestation (une augmentation des forêts de plus de 25%) et permettraient de stocker à maturité 205 milliards de tonnes de CO_2 , soit deux tiers des émissions anthropiques totales depuis le début de l'ère industrielle.

Mais l'optimisme doit être tempéré, car ces résultats présentent plusieurs limites. Les chercheurs n'ont pas déterminé quelle proportion de cette surface appartient à des propriétaires privés. De plus, localement, la reforestation n'est pas forcément synonyme de refroidissement. Aux hautes latitudes, les arbres absorbent plus les rayonnements solaires que ne le fait la neige, qui a un fort



Les forêts tropicales piègent beaucoup de carbone. Une piste pour lutter contre le changement climatique ?

pouvoir réfléchissant, ce qui entraîne un effet réchauffant, au moins en hiver.

Enfin, si le modèle des chercheurs prend en compte le réchauffement, qui implique que certaines régions tropicales, actuellement boisées, verront leur couvert végétal disparaître d'ici à 2050, il omet d'autres facteurs, comme l'augmentation des événements extrêmes ou les attaques de ravageurs. La surface disponible pour la reforestation devrait ainsi baisser plus rapidement. Pour lutter contre le changement climatique, il faut donc agir vite, et avant tout diminuer les émissions de gaz à effet de serre. ■

N. B.

J. F. Bastin et al., *Science*, vol. 365, pp. 76-79, 2019

LE PLUS ANCIEN HOMICIDE EUROPÉEN

L'affaire date de 1941. Cette année-là, des mineurs découvrent un crâne isolé dans la grotte de Cioclovina, dans les Carpates méridionales, en Roumanie. Toutefois, la guerre fait rage et le fossile est oublié jusqu'à dans les années 1970. Des chercheurs y notent alors des blessures, mais ne s'accordent pas sur leur explication. Ce n'est qu'en 2018 que l'équipe d'enquêteurs grecs, roumains et allemands dirigée par Katerina Harvati, de l'université de Tübingen, en Allemagne, débloque enfin le dossier.

Vieux d'environ 33 000 ans selon sa datation par le radiocarbone, ce crâne comporte deux lésions : un enfoncement local entouré de fractures radiales sur le haut du côté droit et une fracture linéaire courant de l'occipital jusqu'à l'os sphénoïde droit (plaque osseuse située en arrière de l'orbite sous la tempe). En comparant ces lésions à celles observées sur les têtes de



Le crâne découvert en 1941 dans la grotte de Cioclovina.

victimes d'homicide au gourdin et de soldats du Moyen Âge morts d'un coup de masse, et en les reproduisant à l'aide de crânes expérimentaux (sphères d'os artificiel remplies de gélatine), les chercheurs ont prouvé qu'un Européen de l'Aurignacien (43 000 à 31 000 ans avant le présent) en a assassiné un autre avec sa massue. ■

F. S.

E. Kranioti et al., *PLOS ONE*, en ligne le 3 juillet 2019

EN IMAGE

MASSAGES À L'ACIDE ET AUX MANDIBULES

La concurrence étant faible, consommer une plante toxique peut être un avantage... à condition de déjouer cette toxicité. La chenille de *Theroa zethus*, un papillon de nuit, est l'une des rares espèces à se nourrir d'euphorbes, plantes annuelles qui produisent un latex blanc irritant, voire léthifère pour les insectes. David Dussourd, de l'université de Central Arkansas, aux États-Unis, et ses collègues ont examiné comment elle bloque l'écoulement du latex des feuilles dont elle se nourrit. Lacérations, jets d'acide, massages... la recette est complexe!

Lorsque les euphorbes sont agressées, elles émettent leur latex, qui s'écoule des entailles. Or quand *T. zethus* grignote les feuilles d'euphorbe, très peu de latex s'écoule. David Dussourd et ses collègues ont donc filmé les chenilles en plein repas: elles exercent avec leurs mandibules une série de compressions sur les pétioles (petites tiges) avant d'en manger les feuilles (*ci-contre*). Mais quand les chercheurs ont reproduit des compressions similaires, l'écoulement de latex ne s'est réduit que de moitié...

En fait, avant de masser les pétioles, *T. zethus* les lacère, puis les asperge de jets d'acide. Les chercheurs ont donc abrasé des pétioles avec du papier de verre avant de les traiter à l'acide. Les pétioles ont alors émis 25 fois moins de latex que ceux traités à l'eau. L'acide entraîne une déformation des parois des cellules végétales, ce qui perturbe l'écoulement du latex. De plus, il ramollit le pétiole et facilite ainsi sa compression. Le cumul des lacérations, de l'acide et des compressions conduit donc à la rupture des canaux laticifères et bloque l'écoulement du latex toxique.

D'autres espèces pratiquent la compression des pétioles et les jets d'acide, mais *T. zethus* est la seule à combiner les deux à des fins alimentaires. L'acquisition de ce comportement lui a permis de conquérir une nouvelle niche écologique, peu exploitée. ■

CORALINE MADEC

D. Dussourd et al., PLOS ONE, vol. 14(7), article e0218994, 2019



© Dussourd et al. / 2019



ASTROPHYSIQUE

'OUMUAMUA: PAS D'EXTRATERRESTRES

En octobre 2017, le télescope Pan-STARRS1, à Hawaï, découvrait le premier objet venu du milieu interstellaire jamais observé dans le Système solaire: 'Oumuamua, «éclaireur» en hawaïen. Les données sur 'Oumuamua sont étonnantes, notamment son passage à seulement 24 millions de kilomètres de la Terre (60 fois la distance Terre-Lune), sa forme allongée inédite et sa vitesse d'éloignement du Soleil, plus élevée qu'attendu.

Pour les expliquer, deux chercheurs du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, aux États-Unis, avaient proposé qu'une civilisation extraterrestre soit à l'origine de ce corps: 'Oumuamua serait une voile solaire utilisant la pression de radiation émise par les étoiles pour se propulser. Mais l'équipe 'Oumuamua de l'Institut international des sciences de l'espace, à Berne, en Suisse, dirigée par Matthew Knight, de l'université du Maryland, aux États-Unis, et Alan Fitzsimmons, de la Queen's University, à Belfast, en Irlande du Nord, a récemment montré qu'il n'est pas nécessaire d'invoquer cette hypothèse.

Premièrement, il n'est pas surprenant d'avoir observé le visiteur si près de la Terre: un biais observationnel rend plus probable la détection des corps célestes à proximité de nos télescopes. Par ailleurs, l'accélération de



L'objet interstellaire 'Oumuamua (ici en vue d'artiste), long de quelques centaines de mètres, ne saurait être une voile solaire, car il tourne sur lui-même.

L'objet pourrait être due à un dégazage, caractéristique des comètes, trop faible pour être détecté. Et une voile solaire ne saurait tourner sur elle-même, comme le fait 'Oumuamua d'après les variations régulières de sa luminosité, puisqu'elle doit toujours s'orienter vers l'étoile pour se propulser! Enfin, divers scénarios naturels, comme des collisions avec d'autres objets, suffisent à expliquer sa forme. La rencontre du troisième type n'est pas pour cette fois-ci! ■

L. P.

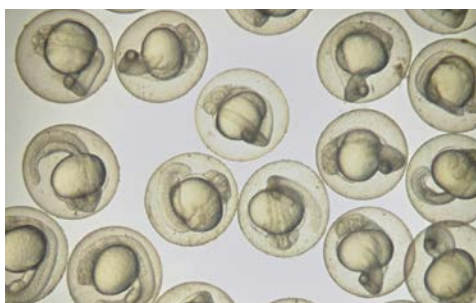
The 'Oumuamua ISSI Team, *Nature Astronomy*, vol. 3, pp. 594-602, 2019

BIOLOGIE ANIMALE

LE POISSON-ZÈBRE DORT COMME NOUS

Les poissons dorment-ils? Oui, comme tous les animaux, même si la plupart gardent les yeux ouverts. Mais leur sommeil restait mal connu. En enregistrant l'activité cérébrale de la larve de poisson-zèbre, Louis Leung, de l'université de Stanford, et ses collègues ont découvert que son sommeil est découpé en au moins deux phases, semblables à celles des amniotes – les mammifères, les oiseaux et les reptiles.

La première phase rappelle le sommeil profond: l'activité musculaire de la larve du poisson-zèbre diminue, sa fréquence cardiaque baisse et les neurones de la zone du cerveau impliquée dans le sommeil sont synchronisés. La seconde phase, qui se traduit par une perte totale de tonus musculaire ainsi qu'un rythme cardiaque lent et irrégulier, ressemble au sommeil paradoxal.



Le sommeil des larves de poisson-zèbre présente des similitudes avec le nôtre.

Les chercheurs ont même montré que l'hormone déclenchant le sommeil paradoxal chez les amniotes régule aussi le sommeil du poisson-zèbre. Ces points communs indiquent que les caractéristiques du cycle du sommeil seraient apparues tôt dans l'histoire évolutive des vertébrés, il y a au moins 450 millions d'années. ■

N. B.

L. C. Leung et al., *Nature*, vol. 571, pp. 198-204, 2019

EN BREF

UN RÉCHAUFFEMENT SANS PRÉCÉDENT DEPUIS 2 000 ANS

Le changement climatique actuel est inédit, en termes de températures... et d'homogénéité spatiale. Raphael Neukom, de l'université de Berne, et ses collègues ont montré que les grands événements climatiques de l'ère préindustrielle (Optimum climatique médiéval, Petit âge glaciaire) n'ont pas eu lieu en même temps dans les différentes régions du monde, contrairement à celui que subit la Terre aujourd'hui. En 2 000 ans, la quasi-totalité de la surface du globe a connu sa période la plus chaude au cours des dernières décennies.

ET L'ARAIGNÉE DEVIENT CANNIBALE

Chez les araignées, c'est la solitude qui entraîne l'agressivité, et non l'inverse. Violette Chiara, de l'université de Toulouse, et ses collègues ont montré que la dispersion des jeunes araignées, après un début de vie en société, était due à l'augmentation de la mobilité au cours de leur maturation. Isolée des signaux de ses congénères, l'araignée perd son comportement social et devient agressive, pouvant même aller jusqu'au cannibalisme. Si elles ne se dispersent pas, les araignées restent sociables.

UNE DISTANCE SATELLITAIRE PRÉCISE

Au milliardième de millimètre: c'est la précision avec laquelle l'équipe de la mission *Grace Follow-On*, menée par la Nasa et le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique, a réussi à mesurer la distance entre deux satellites séparés de 220 kilomètres. Cette prouesse a été réalisée grâce à des interféromètres laser embarqués. En mesurant d'infimes changements dans la distance, il sera possible de cartographier les variations du champ gravitationnel terrestre, liées à des paramètres géophysiques et climatiques.



Coléoptères

insectes extraordinaires

musée des
confluences

21.12.2018 – 03.11.2019



GRAND LYON
la métropole

Grains
de sel

LE PROGRÈS



VIROLOGIE

UN TRAITEMENT SUPPRIME LE VIRUS DU SIDA CHEZ LA SOURIS

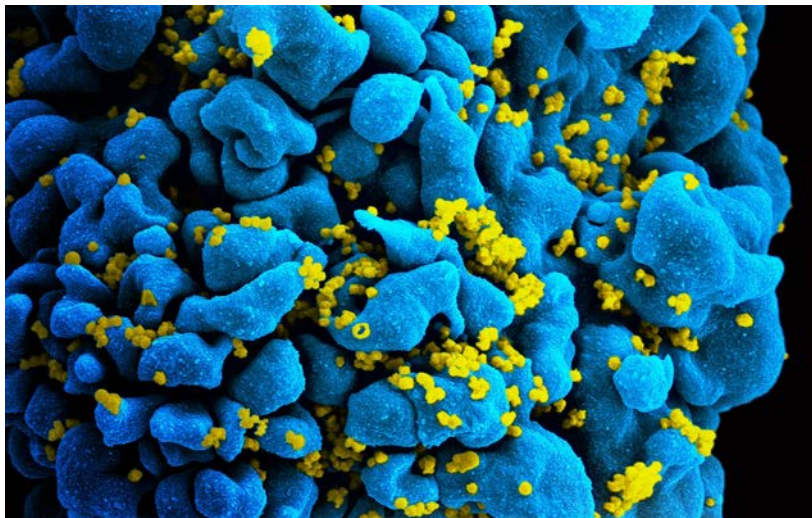
Grâce à la combinaison de deux techniques de pointe, une équipe est parvenue à supprimer toute trace du virus du sida chez des souris modèles infectées.

S'il n'existe à ce jour aucun moyen de guérir une personne atteinte du sida, des traitements empêchent le virus de l'immunodéficience humaine (VIH), responsable de la maladie, de se répliquer. Toutefois, celui-ci persiste dans un état dormant au sein de l'organisme. Aussi ces thérapies antirétrovirales (ART), lourdes, doivent-elles être prises à vie, sans quoi le virus se «réveille» et l'état des patients s'aggrave. De nombreux efforts sont donc déployés pour mettre au point un traitement efficace et définitif contre le VIH. Une équipe dirigée par Howard Gendelman, de l'université du Nebraska à Omaha, aux États-Unis, et Kamel Khalili, de l'université Temple, à Philadelphie, vient ainsi d'obtenir des résultats encourageants: elle a supprimé toutes traces du virus chez des souris modèles infectées.

Le VIH, qui touche les cellules immunitaires, est capable d'intégrer son matériel génétique dans leur génome et d'y demeurer dans un état latent. C'est par ce biais qu'il résiste à l'action de divers traitements et ressurgit si la thérapie antirétrovirale est interrompue. Dans de précédents travaux, l'équipe de Philadelphie avait développé une technique d'édition génétique pour supprimer dans l'ADN certains fragments indésirables, comme les séquences du VIH. Les chercheurs avaient utilisé le complexe moléculaire nommé CRISPR-Cas9, qui fait office de «ciseaux génétiques». Toutefois, ils s'étaient rendu compte que, utilisée seule, cette approche n'éliminait pas l'ensemble des virus présents dans l'organisme.

Parallèlement, l'équipe d'Omaha avait développé une autre technique, dite de thérapie antirétrovirale à libération lente et à action prolongée (LASER-ART). Elle consiste à administrer une substance antirétrovirale utilisée en ART classique non plus sous forme de comprimé, mais confinée dans des nanocristaux hydrophobes et lipophiles, lesquels traversent facilement les membranes des cellules jusqu'aux réservoirs viraux les plus difficiles d'accès – des tissus et organes où le virus demeure en grand nombre dans un état latent. Les nanoparticules y relâchent alors progressivement le médicament pendant plusieurs semaines.

Dans leur nouvelle étude, les chercheurs ont combiné ces deux approches chez des



Le VIH (en jaune) cible les cellules du système immunitaire, tel ce lymphocyte (en bleu). Dans certaines, nommées «réservoirs», il est capable de rester en dormance, échappant ainsi aux thérapies actuelles.

36,7

MILLIONS
C'EST LE NOMBRE
DE PERSONNES
PORTEUSES DU VIRUS
DU SIDA RECENSÉES
EN 2016 PAR
L'ORGANISATION
MONDIALE
DE LA SANTÉ.

souris modifiées pour produire des cellules immunitaires humaines et infectées par le VIH. Ils ont traité ces animaux par LASER-ART, puis ont édité le génome de leurs cellules grâce à CRISPR-Cas9. Résultat: huit semaines après le traitement, un tiers des souris examinées ne présentaient plus aucune trace de matériel génétique viral dans le génome de leurs cellules immunitaires.

Les chercheurs estiment que la combinaison de ces deux méthodes constitue une avancée prometteuse dans la quête d'un traitement durable et définitif contre le VIH. Ils prévoient de tester leur approche sur des patients humains lors d'essais cliniques dans les mois à venir. «L'étude est intéressante et novatrice» commente Asier Sáez-Cirión, qui dirige le groupe Réservoirs et contrôle viral à l'institut Pasteur. «Toutefois, le modèle de souris humanisée est limité, car de telles souris sont dépourvues des réservoirs anatomiques humains majeurs du VIH. On peut aussi s'interroger sur l'efficacité du traitement à long terme. Enfin, il reste à déterminer si l'édition génétique n'engendrera pas d'effets délétères chez les personnes dont l'état de santé se maintient grâce à l'ART.» ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

P. K. Dash *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 2753, 2019

TIRER PARTI DES ALGUES VERTES

L'été, de par le monde, des plages sont envahies d'ulves, les algues vertes que favorisent les rejets de nitrate issus de l'agriculture. Lukas Reisky, de l'université de Greifswald, en Allemagne, Aurélie Préchoux, de la Station biologique de Roscoff, et leurs collègues ont élucidé comment une bactérie, *Formosa agariphila*, transforme l'ulvane, le principal constituant des parois cellulaires des ulves, en sucres exploitables dans l'industrie chimique ou pour la fabrication de biocarburants. La bactérie découpe cette longue chaîne ramifiée de sucres simples à l'aide de douze enzymes. Certaines la scindent en chaînes plus petites, que d'autres fragmentent en sucres simples, tandis qu'une dernière famille supprime les groupes sulfate qui les parsèment et qui sont à l'origine des gaz toxiques émis lors de la décomposition des ulves. De quoi se réconcilier avec les algues vertes? ■

MARTIN TIANO

L. Reisky et al., *Nature Chemical Biology*, vol. 15, pp. 803-812, 2019

LE DISQUE FROID DU TROU NOIR

Comme tous les trous noirs, Sagittarius A*, le trou noir supermassif dissimulé au cœur de la Voie lactée, ne se laisse pas facilement observer. Rien ne s'en échappe, pas même la lumière. Les astrophysiciens scrutent donc son voisinage. Ils étudient notamment son disque d'accrétion, qui contient du gaz chaud (10^7 kelvins). On supposait par ailleurs que du gaz froid était présent dans le voisinage plus proche du trou noir. Grâce au radiotélescope *Alma* (*Atacama large millimeter/submillimeter array*), Elena Murchikova, de l'Institut d'études avancées à Princeton, et son équipe ont observé pour la première fois cette matière sous la forme d'un disque de température inférieure à 10^4 kelvins (ce qui en fait tout de même un plasma) et distant de seulement 0,025 année-lumière de Sagittarius A*! Les chercheurs ont aussi mesuré sa masse: entre un centième et un dixième de la masse de Jupiter. Grâce à leurs mesures, les chercheurs ont également montré que ce disque est en rotation. ■

L. P.

E. Murchikova et al., *Nature*, vol. 570, pp. 83-86, 2019

L'ORIGINE DE LA COLLERETTE DU DRAGON



Quand il se sent en danger, le dragon d'Australie déploie sa collerette, ce qui le rend plus menaçant aux yeux de son potentiel agresseur.

Il a inspiré l'un des dinosaures iconiques du film *Jurassic Park*: le dragon d'Australie, *Chlamydosaurus kingii*, est un lézard vivant en Australie et en Nouvelle-Guinée, de 85 centimètres de long en moyenne. Quand un prédateur, comme le python, ou un concurrent s'approche, il déploie sa collerette à la façon d'un parapluie, ce qui suffit souvent à les effrayer. L'équipe de Michel Milinkovitch, de l'université de Genève, s'est penchée sur le développement embryonnaire de cette structure spectaculaire.

En observant des œufs de dragon d'Australie à différents stades, les biologistes ont déterminé l'origine des os de la collerette: le deuxième arc branchial. Les arcs branchiaux sont des structures embryonnaires des vertébrés, dont la fonction première est de porter les branchies, comme c'est toujours le cas chez les poissons. Chez les vertébrés terrestres, le deuxième arc branchial fusionne avec les suivants. Il contribue, chez l'humain, à la formation de l'os hyoïde, impliqué dans la parole et la déglutition.

Mais chez les épisquamates, le groupe de lézards auquel appartient le dragon d'Australie, cette fusion est incomplète, ce qui engendre une excroissance cervicale. Dans le cas du dragon, l'arc branchial et donc l'excroissance associée grandissent démesurément et forment la collerette.

Les chercheurs ont aussi élucidé l'apparition des trois plis qui facilitent le rabattement de la collerette sur le corps du lézard. Le mécanisme embryologique identifié n'est pas génétique, mais topologique! Par modélisation, ils ont montré que le repliement de la collerette est dû à son attachement au cou: à mesure qu'elle croît, même de façon homogène, elle se fronce, à la manière d'un rideau qui se plisse à cause du raccourcissement de son bord supérieur. ■

N. B.

S. A. Montandon et al., *eLife*, vol. 8, article e44455, en ligne le 25 juin 2019

CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 260 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2020

L'organisme de formation continue du CNRS présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans les domaines suivants :

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE	PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION	BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE
BIOINFORMATIQUE	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES
GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION	CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS	QUALITÉ ET SÉCURITÉ
TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT	CHIMIE ANALYTIQUE	SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE
SCIENCES DE L'INGÉNIEUR	MICROSCOPIE ET IMAGERIE	COGNITION ET COMPORTEMENT
	BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE	

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de **former plus de 1600 professionnels chaque année** issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

LES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2020

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE - Linkage : analyse conjointe de réseaux et de corpus le 06/03/2020 PARIS - 1 jour 700 € - L'analyse sémantique fine des textes et débats : introduction aux traitements automatiques et au modèle cartographique des Atlas sémantiques du 30 au 31/03/2020 PARIS - 2 jours 1 000 € - Fondements du machine learning et du deep learning du 11 au 14/05/2020 MARSEILLE - 4 jours 2 200 € - Apprentissage automatique : introduction aux techniques récentes et mise en pratique sous Python du 25 au 26/05/2020 CLERMONT-FERRAND - 2 jours 1 000 € - Apprentissage automatique pour la vision par ordinateur du 15 au 17/06/2020 LYON - 3 jours 1 800 € - Intelligence artificielle et réseaux de neurones artificiels - concepts et applications du 01 au 02/10/2020 GRENOBLE - 2 jours 1 300 €	BIOINFORMATIQUE - Bioinformatique pour la métagenomique du 03 au 05/06/2020 MONTPELLIER - 2,5 jours 1 200 € - Analyse bioinformatique des séquences nucléiques et protéiques du 17 au 19/06/2020 VILLENUEVE D'ASCQ - 3 jours 1 300 € - Bioinformatique : alignement et comparaison de séquences nucléiques et protéiques du 17 au 18/09/2020 VILLENUEVE D'ASCQ - 2 jours 900 € GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION - Développement logiciel : cycle et prévention des risques juridiques le 06/10/2020 PARIS - 1 jour 600 € TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT - Initiation aux SIG en écologie : de la collecte au traitement de données géographiques du 18 au 20/05/2020 POITIERS - 2,5 jours 800 €	- Les systèmes d'information géographique (SIG) au service des sciences de l'homme et de l'environnement du 10 au 12/06/2020 BESANÇON - 3 jours 950 € SCIENCES DE L'INGÉNIEUR - Python data analysis for GATE simulations du 10 au 12/03/2020 CLERMONT-FERRAND - 3 jours 1 000 € - Vérification et validation de simulations en dynamique des structures du 17 au 20/03/2020 BESANÇON - 4 jours 2 200 € - Applications du calcul scientifique dans l'industrie : introduction du 17 au 19/03/2020 PARIS - 3 jours 1 500 € - Robotics Operating System 2 : perfectionnement du 09 au 10/06/2020 TOULOUSE - 2 jours 1 300 € - Simulations de robots sous Gazebo : introduction du 16 au 17/06/2020 TOULOUSE - 2 jours 1 300 €
--	---	--

Découvrez l'ensemble des stages de formation sur
cnsrformation.cnrs.fr

Ou contactez-nous à cfe.contact@cnrs.fr ou 01 69 82 44 55



• GATE training on medical imaging (PET, SPECT, CT), dosimetry and radiation therapy - Beginner level
du 17 au 19/11/2020
CLERMONT-FERRAND - 3 jours 1 000 €

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

• Interactions plasma / surfaces : utilisation des plasmas froids pour le traitement de surfaces
du 24 au 27/03/2020
GRENOBLE - 3,5 jours 1 700 €

• Impression 3D laser : applications pour la conception de microsystèmes et puces microfluidiques
du 17 au 18/06/2020
TOULOUSE - 2 jours 1 200 €

• Micro-fabrication en salle blanche : réalisation d'un micro-pyro-système
du 18 au 20/11/2020
TOULOUSE - 3 jours 1 400 €

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

• Rheologie
du 01 au 03/04/2020
PARIS - 3 jours 1 850 €

• Fluorescence X de type EDX
du 28 au 29/05/2020
LE MANS - 2 jours 1 200 €

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

• Mécanochimie pour une chimie de synthèse éco-compatible
du 01 au 02/04/2020
MONTPELLIER - 2 jours 1 100 €

• Transformation de la biomasse en produits chimiques de spécialité
du 11 au 12/06/2020
POITIERS - 2 jours 1 100 €

CHIMIE ANALYTIQUE

• Préparation d'échantillons par fusion alcaline pour analyses ICP
du 11 au 12/06/2020
VANDŒUVRE-LES-NANCY - 1,5 jour 900 €

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

• Cytométrie en image
du 18 au 20/11/2020
LYON - 3 jours 1 300 €

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

• La cytométrie en flux appliquée à la microbiologie
du 01 au 03/04/2020
VALBONNE - 2,5 jours 1 000 €

• Cytométrie en flux : retraitement des données avec FlowJo
du 04 au 06/05/2020
TOULOUSE - 2,5 jours 1 100 €

• Cytométrie avancée et standardisation
du 28 au 29/09/2020
TOULOUSE - 2 jours 900 €

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

• Préparer des banques NGS à partir d'ADN et d'ARN : les étapes pratiques et méthodologiques appliquées à la technologie Illumina
du 09 au 11/03/2020
LYON - 3 jours 2 000 €

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

• Les 3 R en pratique, raffinement, points limites
le 03/03/2020
GIF-SUR-YVETTE - 0,5 jour 300 €

QUALITÉ ET SÉCURITÉ

• La prévention des risques biologiques
le 31/03/2020
MARSEILLE - 1 jour 450 €

• Maîtrise des risques potentiels liés aux nanomatériaux en laboratoire de recherche
le 06/10/2020
NANCY - 1 jour 450 €

SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

• Politiques publiques de santé : organisation, droit, territoire
du 10 au 12/03/2020
GRENOBLE - 3 jours 1 300 €

• Le marché halal dans les entreprises et les administrations : économie et enjeux sociétaux
le 28/05/2020
PARIS - 1 jour 800 €

• Politiques publiques de santé : accès, équité, vulnérabilités
du 07 au 09/10/2020
GRENOBLE - 3 jours 1 300 €

• Jeunesses en exil : quel accueil des mineurs non accompagnés ?
du 23 au 25/11/2020
PARIS - 3 jours 850 €

COGNITION ET COMPORTEMENT

• Identifier les causes sociales d'une conduite humaine pour la modifier
du 12 au 13/03/2020 et le 12/06/2020
LILLE - 3 jours 1 200 €

• Personnes autistes dans l'entreprise : inclusion, innovation et création de valeur - introduction pour les décideurs
le 13/03/2020 et le 02/04/2020
PARIS - 2 sessions de 2h 400 €

• Le comportement émotionnel : quantifier les effets des émotions sur les actions corporelles et les stratégies visuelles
du 23 au 25/03/2020
TOURCOING - 2,5 jours 1 500 €

• Les mouvements oculaires : techniques d'oculométrie, recueil et analyse de mouvements oculaires, interprétation, applications
du 26 au 27/03/2020
PARIS - 2 jours 1 200 €

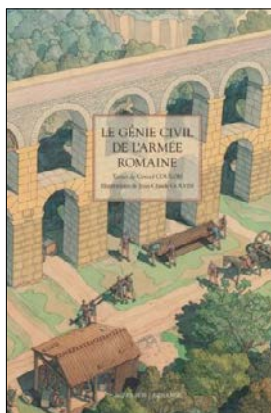
• Personnes autistes dans l'entreprise : inclusion, innovation et création de valeur
du 02 au 03/04/2020
PARIS - 1,5 jours 1 000 €

• La communication interpersonnelle dans les relations humaines : fondamentaux, analyses et mises en pratique
du 26 au 27/05/2020
PARIS - 2 jours 1 000 €

• Les effets des stéréotypes de genre sur les inégalités hommes-femmes en entreprise : sensibilisation
le 27/05/2020
MARSEILLE - 1 jour 500 €

• Les effets des stéréotypes de genre sur les inégalités hommes-femmes en entreprise (suite) : mise en oeuvre d'interventions
du 28 au 29/05/2020
MARSEILLE - 2 jours 900 €

• La méthode scientifique : éclairages en philosophie des sciences
le 28/05/2020
PARIS - 1 jour 700 €

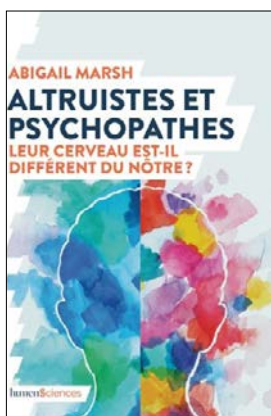


ARCHÉOLOGIE

**LE GÉNIE CIVIL
DE L'ARMÉE ROMAINE**

Gérard Coulon (texte) et
Jean-Claude Golvin (illustrations)

Errance, 2018
160 pages, 33 euros



NEUROSCIENCES

**ALTRUISTES
ET PSYCHOPATHES**
Abigail Marsh

Humensciences, 2019
397 pages, 24,50 euros



Le touriste qui admire les monuments élevés par

les Romains un peu partout s'est-il jamais demandé qui les avait réalisés? Les soldats! L'armée romaine était

un formidable outil de conquête et de domination. Mais qu'en faire, lorsque la paix régnait? Généraux puis empereurs avaient soin de lutter contre les délices de Capoue. Un soldat ne devait jamais s'ennuyer ni rester oisif. Il fallait l'occuper, et quoi de mieux que lui faire réaliser des grands travaux qui allaient l'épuiser et contribuer à impressionner les populations locales? Attention cependant à ne pas en abuser, sous peine de finir comme Probus, l'empereur assassiné par ses troupes parce qu'il leur demandait d'assécher des marais, besogne qui paraît-il leur répugnait.

Un soldat romain n'était pas qu'une brute assoiffée de sang. Sous le casque se cachait un artisan habile, un ingénieur réputé ou un architecte inspiré. Les descriptions précises de Gérard Coulon, puissamment soutenues par les aquarelles de Jean-Claude Golvin, nous permettent aujourd'hui de mesurer l'ouvrage gigantesque de ces personnes la plupart du temps anonymes, qui bénéficiaient de ce qui nous manque aujourd'hui: le temps et le nombre.

C'est ainsi que Marius, en attendant les Cimbres et les Teutons, occupa ses 60 000 à 70 000 hommes pour creuser les fosses Mariennes. Créer des canaux, étendre des aqueducs, construire et réparer des routes ou des ponts, dresser des phares, exploiter les mines et les carrières, fonder colonies et villes, autant de prouesses que les auteurs nous exposent ici à la manière d'un reportage. Leur souvenir, par-delà les siècles, continue de perpétuer la gloire de Rome.

ROMAIN PIGEAUD
CNRS-UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Qu'est-ce qui nous inspire des actes altruistes ou, à l'opposé, égoïstes et impitoyables?

Considérez un instant à ce qui suit: les psychopathes, ces champions de l'égoïsme sans merci, s'avèrent quasiment insensibles à la peur! Même s'ils arrivent à reconnaître les expressions des autres émotions majeures, comme la colère, la joie, le mépris, le dégoût et même la douleur, ils sont désarmés quand on leur demande de décrire la peur, et ont beaucoup de mal à l'identifier chez les autres.

Comment expliquer cette particularité? Les travaux de l'auteure de ce livre et d'autres neuroscientifiques révèlent que le cerveau des psychopathes se caractérise par une défaillance de l'amygdale, une structure essentielle dans le traitement des émotions en général et particulièrement de la peur. Chez les psychopathes, non seulement l'amygdale répond peu aux images de personnes apeurées, mais elle est jusqu'à 20% plus petite que la moyenne.

Suite à cette constatation, Abigail Marsh s'est demandé ce qu'il en était des personnes situées à l'autre bout du spectre: les altruistes extrêmes, des gens pleins de compassion qui, par exemple, se portent volontaires pour donner un de leurs reins à une personne inconnue. Ce qu'elle a trouvé est remarquable: les altruistes extrêmes surpassent tout le monde dans la détection de la peur chez les autres. Et dans le même temps, ils font des choses très courageuses. Depuis cette découverte, plusieurs études ont confirmé que la capacité à reconnaître la peur chez les autres prédisait mieux les attitudes et comportements altruistes que le genre, l'humeur ou le degré de compassion déclaré. Mieux encore, Abigail Marsh a montré que l'amygdale droite des altruistes extrêmes était plus grosse que la normale, d'environ 8%.

Ce bref aperçu montre assez pourquoi le livre d'Abigail Marsh est fascinant.

MATTHIEU RICARD
DOCTEUR EN GÉNÉTIQUE CELLULAIRE
ET MOINE BOUDDHISTE

CHOLÉRA - HAÏTI 2000-2018, HISTOIRE D'UN DÉSASTRE

Renaud Piarroux

CNRS Éditions, 2019
298 pages, 22 euros

Le choléra est connu pour la rapidité avec laquelle il transforme sa victime en cadavre, par déshydratation intense due à diarrhées et vomissements. Mais il suffit de réhydrater avec des litres d'eau salée, à boire ou en perfusion: simple comme bonjour, non? Pourtant, dans l'Haïti de 2010 et en trois semaines, s'est installée une catastrophe sanitaire qui a fait des milliers de morts.

Dans ce témoignage passionnant, l'expert invité par le gouvernement haïtien, Renaud Piarroux, met le pied en arrivant sur un nœud de vipères: l'épidémie est née près du camp de la Minustah, les forces onusiennes de la paix, où un contingent népalais a débarqué alors qu'une épidémie sévissait à Katmandou. Or depuis son apparition au Pérou en 1991, le choléra s'est implanté en Amérique latine. Est-ce un voyageur contaminé qui a fourni le germe, ou le vibron mijotait-il depuis longtemps dans le plancton marin, à la faveur du réchauffement climatique? Renaud Piarroux conteste ces théories improbables et revient obstinément à la fosse septique du camp népalais, même si aucune diarrhée n'y a été signalée. Il relate le long casse-tête scientifique et politique et les réticences du milieu médical à accepter sa démonstration.

Quand les faits surnageront en dépit des dénégations en haut lieu onusien, restera à faire la part juridique des responsabilités et à dédommager les victimes. Mais les réparations tarderont, tandis que l'épidémie continue à couvrir, tant il est difficile d'assurer l'accès à l'eau potable, de chlorer les sources, de sécuriser les tuyauteries, d'améliorer les latrines, face au puzzle des financements qui se tarissent. Mais quelle malédiction frappe donc une île pourtant si proche du Maître du monde américain?

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHERE,
CNRS/UNIVERSITÉ PARIS-DIDEROT**LETTRE OUVERTE AUX MANGEURS DE VIANDE QUI SOUHAITENT LE RESTER SANS CULPABILISER**

Paul Ariès

Larousse, 2019
180 pages, 9,95 euros

Le véganisme prend de l'ampleur médiatique dans notre société. Les partisans de cette mouvance militent dans le but d'épargner la souffrance des espèces vivantes douées de sensibilité. Dans le même temps, ils s'affirment comme une force politique et morale œuvrant pour un changement radical de la société: adeptes de l'«antispécisme», ils nient toute prééminence humaine au profit d'une totale équité entre espèces.

À bien des égards, ce livre au ton radical fait écho à mes expériences: en tant que nutritionniste, je ne peux donner une conférence sans que des contradicteurs cherchent par tous les moyens à m'empêcher d'exprimer une vision scientifique... Amis végétariens, au-delà de votre légitime volonté de s'opposer à la souffrance animale, êtes-vous sûrs de connaître tous les fondements du véganisme? Et vous omnivores, savez-vous ce qu'est vraiment la galaxie végétarienne?

L'auteur a le mérite de dénoncer des dérives inquiétantes. Il montre comment les végétariens, majoritairement jeunes, issus de milieux plutôt aisés et urbains, éduqués, animés d'un réel souci écologique et de générosité, se retrouvent piégés par des idéologues sulfureux, poursuivant une tout autre logique aux relents totalitaires et déshumanisants.

À partir d'enquêtes menées depuis plus de vingt ans et sur la base des articles publiés par «les cahiers antispécistes», l'auteur s'attache à démystifier les arguments de façade pour mieux s'introduire au cœur de cette mouvance sectaire, animée par des zéloteurs qui veulent combattre la souffrance animale par tous les moyens, y compris les plus violents et fascisants. Avec ce livre passionnant, on comprend pourquoi l'antispécisme et le véganisme sont bien les symptômes d'une distorsion des représentations d'égalité, de solidarité et de responsabilité dans notre société en quête d'idéal et, *in fine*, une perversion antihumaniste.

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT**TRAITÉ DE PERSPECTIVE**

Jean Letourneur

Eyrolles, 2019
216 pages, 29 euros

L'avènement du numérique a-t-il signé la mort du dessin d'architecte? Bien au contraire, et le sculpteur Jean Letourneur, qui enseigne à l'École nationale supérieure d'architecture de Paris-La Villette, nous le montre dans cet étonnant traité, inspiré de la méthode de perspective du plasticien Claude Prevost, la bien nommée «conception assistée par le crayon». À l'aide de plus de 400 dessins à la craie effectués à mains levée sur les murs de l'école, il amène peu à peu le lecteur des différentes représentations d'un cube à celle d'ombres complexes en perspective à trois points de fuite. À vos craies!

ÉCOLOGIE

Rick Relyea et Robert Ricklefs

De Boeck Supérieur, 2019
640 pages, 67 euros

Comme toute économie, celle de la nature est caractérisée par divers acteurs soumis à des lois. Ses acteurs sont les organismes individuels, les populations, les écosystèmes et la biosphère dans son ensemble, et ses lois, celles de la physique. Partant de ce constat, ce manuel explore pas à pas l'écologie à toutes les échelles. Destiné aux enseignants et étudiants du domaine, il offre ainsi à tout lecteur curieux un outil clair et documenté pour comprendre l'écologie globale actuelle et ses enjeux.

LE PARRAIN

Caitlin O'Connell

Actes Sud, 2019
320 pages, 23 euros

Chaque année de 2005 à 2013, le temps d'une saison, Caitlin O'Connell, spécialiste américaine des éléphants à l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont suivi l'évolution d'un groupe de mâles dans le parc national d'Etosha, en Namibie, cherchant à comprendre l'organisation de cette société et de sa hiérarchie. Son récit, qui mêle observations, réflexions et quotidien de l'équipe dans cet environnement sauvage fourmillant d'informations tout en se lisant comme un roman. Lutte pour la place de dominant, affinités, disputes, rencontres... au fil de l'ouvrage se dessine une vie sociale complexe et riche en rebondissements.

MELUN (SEINE-ET-MARNE)

JUSQU'AU 22 SEPTEMBRE 2019
Musée de la Gendarmerie nationale
www.gendarmerie.interieur.gouv.fr/musee

Des animaux et des gendarmes

On peut être surpris de découvrir à quel point les animaux sont présents dans le monde de la gendarmerie. Bien sûr, ~~chacun sait le rôle important que jouent les chiens dans la recherche de personnes, de stupéfiants ou d'explosifs. On se souvient aussi que le cheval était, il n'y a pas si longtemps, le moyen de transport de la maréchaussée, et qu'il subsiste dans la Garde républicaine et dans quelques autres unités. Mais on se souvient moins que des mulets, des dromadaires et même des éléphants ont, hors de la France métropolitaine, servi d'animaux de selle ou de bât.~~

D'autres auxiliaires non négligeables des gendarmes sont les insectes, du moins ceux qui sont nécrophages et qui permettent, dans les enquêtes criminelles, de déterminer sur un cadavre la date de la mort.

Par ailleurs, l'une des tâches qui incombent aux gendarmes est d'intervenir lorsque des animaux constituent une menace (chiens errants, loups, requins, fauves échappés d'un zoo...), afin de protéger le public. Inversement, il s'agit aussi de protéger les animaux dans des cas de maltraitance, de trafic, de braconnage... Et de



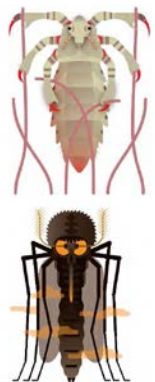
veiller à ce que les pêches respectent la réglementation (permis, tailles des prises, dimensions des mailles des filets...).

Ce sont tous ces aspects, et d'autres, comme l'usage des motifs animaux, que l'exposition aborde à l'aide de photos, d'anecdotes, d'œuvres d'art et autres pièces de musée. ■

LYON

JUSQU'AU 3 MAI 2020
Musée des Confluences
www.museedesconfluences.fr

Mini-monstres, les invisibles



Cette exposition vise les enfants âgés de 7 à 12 ans et se focalise sur sept sortes de petites bestioles qui vivent à nos dépens : poux, puces, tiques, moustiques, punaises de lit, mouches, acariens. Appuyée notamment par de spectaculaires vues en microscopie électronique, elle présente ces mini-monstres, leurs modes de vie, leurs méfaits. ■

POITIERS

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020
Espace Mendès-France
<https://emf.fr>

Khéops La grande pyramide



Après la visite, vous saurez tout ou presque sur la pyramide de Khéops, l'une des sept merveilles de l'Antiquité : quand et comment elle a été édifée, ce qu'elle contient, la nécropole dont elle est l'élément central, et jusqu'à la technique d'avant-garde (radiographie par muons) utilisée récemment et qui a révélé deux cavités inconnues. ■

ET AUSSI

Jeudi 5 septembre, 18 h
Campus Aiguier, Marseille
provence-corse.cnrs.fr

LE VIN À LA CONQUÊTE DU MONDE

Danielle Cornot, maîtresse de conférences à l'université Toulouse-Jean-Jaurès, commente l'évolution mondiale de la culture et du commerce du vin, à l'heure où de nombreux pays s'ouvrent à sa consommation et à sa production.

Mercredi 11 septembre, 18 h
Auditorium du Musée d'histoire de Marseille
Tél. 04 91 55 36 00
musees.marseille.fr

L'EMPIRE ROMAIN PAR LE MENU

Conférence de Dimitri Tilloi-D'Ambrosi, agrégé et doctorant en histoire, auteur de *L'Empire romain par le menu*. En lien avec l'exposition *On n'a rien inventé !* (voir page ci-contre).

Du 12 au 15 septembre
Eden Théâtre, La Ciotat (13)
<https://lumexplore.com>

FESTIVAL LUMEXPLORE

Ce festival du film d'exploration scientifique et environnementale propose plusieurs dizaines de films, en compétition ou hors compétition.

Jusqu'au 30 septembre
Musée de Nantes
<https://museum.nantesmetropole.fr>

À LA RECHERCHE DU CAMÉLIA SAUVAGE

Les camélias de nos parcs et jardins sont issus de plantes sauvages des forêts d'Asie. L'artiste naturaliste Denis Clavreul est allé peindre celles-ci dans leurs milieux naturels.

Jusqu'au 15 novembre 2020
Musée d'art et d'histoire Romain-Rolland Clamecy (Nièvre)
Tél. 03 86 27 17 99

INTARANUM

Entrains-sur-Nohain, au début de notre ère : les fouilles préventives réalisées de 2008 à 2015 ont confirmé la richesse de ce site, liée à l'artisanat du fer.

DIJON

JUSQU'AU 17 NOVEMBRE 2019

Jardin des sciences
Tél. 03 80 48 82 00

Nature incognito



Faut-il aller à la campagne pour retrouver la «nature»? Pas nécessairement, comme le montre cette exposition dont l'objectif est de faire découvrir aux visiteurs la biodiversité des milieux urbains, qui passe le plus souvent inaperçue. De fait, les villes sont des mosaïques de milieux particuliers (balcons fleuris, jardins, parcs, chantiers, friches, bords végétalisés des voies...) où des espèces, assez nombreuses en fin de compte, peuvent survivre, s'adapter et parfois proliférer, malgré ou grâce à la présence des humains. L'exposition montre en quoi les milieux urbains sont particuliers, illustre leur biodiversité avec de nombreux exemples et évoque divers résultats d'études scientifiques récentes. ■

BLOIS

JUSQU'AU 22 SEPTEMBRE 2019

Maison de la magie
www.maisondelamagie.fr



Magie & sciences amusantes

À l'occasion de la célébration des «500 ans de Renaissance» par la Région Centre-Val-de-Loire, la Maison de la magie Robert-Houdin expose une centaine d'objets de collection, très rares pour certains, qui permettent aux visiteurs de plonger dans le monde de la magie et, surtout, de son histoire du XVI^e au XX^e siècles. L'histoire d'un art qui s'est beaucoup nourri des développements des sciences et techniques, qui offrent aux illusionnistes des possibilités toujours nouvelles. ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 8 septembre
Alpes-de-Haute-Provence
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

LE LAC DU LAUZANIER

Excursion à la journée en haute Ubaye, où l'on pourra admirer ce lac de montagne et découvrir sa géologie.

Vendredi 20 septembre
Saint-Georges-de-Commiers (Isère)
Tél. 04 76 42 98 13
www.fne-aura.org

FIN D'ÉTÉ EN FORÊT

De 17 h à 20 h, une promenade pour observer l'installation de l'automne au travers des migrations, de la fructification des arbres, des petites bêtes qui s'affairent dans la litière forestière...

Samedi 21 septembre, 10 h
Saint-Maurice-Navacelles (Hérault)
Tél. 04 67 44 75 79
www.cpie-causses.org

LES CONFIDENCES DES MÉGALITHES

Sous la houlette d'une archéologue passionnée de poterie, une journée de balade à la découverte des traces laissées par les hommes et de leurs techniques de poterie.

Vendredi 27 septembre
Lac Redon, Flassans-sur-Issole (Var)
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

PHOTOGRAPHIE DE PAPILLONS... DE NUIT

Le lac Redon est un site réputé pour sa plante endémique, l'armoise de Molinier. Une chasse photographique et nocturne aux papillons est ici proposée.

Vendredi 27 septembre
Vendœuvres (Indre)
parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13

CERVIDÉS EN FORÊT DE LANCOSME

Le Domaine du Coudreau, propriété privée de 330 hectares, ouvre exceptionnellement ses portes pour une sortie vespérale à la rencontre de ses hardes de cervidés.

MARSEILLE

JUSQU'AU 24 NOVEMBRE 2019

Musée d'histoire de Marseille
musee-histoire-marseille-voie-historique.fr/

On n'a rien inventé!

Que mangeait-on à l'époque des Romains? Quels produits alimentaires commercialisait-on? En quoi consistait la gastronomie? Ces questions reçoivent ici des réponses à la lumière des fouilles archéologiques subaquatiques menées depuis plusieurs années dans le Rhône, près d'Arles.

Certaines des céramiques découvertes sont si bien conservées qu'elles portent encore leur étiquette commerciale peinte en latin. L'étude de ces inscriptions et celle de restes alimentaires, combinées à l'apport des textes antiques, révèlent tout un ensemble de produits et de



recettes... qui sont très proches des produits, savoir-faire et techniques de conditionnement en vigueur aujourd'hui. L'exposition s'achève par de l'archéologie expérimentale effectuée en 2010 sur des restes d'un banquet enterrés dix-sept ans auparavant. Avec des résultats plutôt étonnants! ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

DE L'INTÉRÊT D'ENSEIGNER PAR PROJETS

L'enseignement de l'informatique accorde une place importante à la réalisation de projets. Un mode d'apprentissage qui présente des similarités avec l'activité des chercheurs.



La pédagogie par projets valorise l'action ainsi que l'autonomie.

Cette rentrée 2019 est sans doute « révolutionnaire » puisque, pour la première fois, l'informatique sera en France enseignée en tant que telle à tous les élèves, et non uniquement à certains. Indépendamment de ce que nous pensons d'autres aspects de la réforme du lycée et des difficultés de la mise en œuvre de cet enseignement, nous pouvons donc nous réjouir de cette décision, qui profitera à l'ensemble des sciences et des techniques. Cette rentrée est aussi l'occasion de nous interroger sur la spécificité de l'enseignement de l'informatique, qui donne une place centrale à la notion de projet.

L'enseignement par projets repose sur une idée simple : nous apprenons mieux en agissant qu'en écoutant quelqu'un parler. Cette idée, souvent attribuée au psychologue et philosophe américain John Dewey ou au pédagogue français Célestin Freinet, est en fait beaucoup plus ancienne puisqu'une citation attribuée à Confucius (vi^e siècle avant notre ère) dit : « J'entends et j'oublie, je

vois et je me souviens, je fais et je comprends. »

Cette idée de l'efficacité de l'action est déjà à l'œuvre au lycée dans de nombreux enseignements, qui accordent une place importante à la résolution d'exercices. Mais un projet est bien différent d'un exercice.

Nous apprenons au mieux quand nous apprenons dans le but d'utiliser ce que nous apprenons

Supposons par exemple que, lors d'un exercice, on demande à l'élève d'étudier le mouvement d'un objet glissant sans frottement sur un plan incliné. Si cet élève décide, de son propre chef, de considérer aussi les forces de frottement, en se documentant par lui-même sur les lois de Coulomb, sa réponse sera « hors sujet ».

En revanche, dans le cadre d'un projet, cette réappropriation de la question est attendue. La pédagogie par projets ne valorise donc pas uniquement l'action, mais aussi l'autonomie. C'est pour cela que, même si nous donnons la même consigne initiale à deux groupes d'élèves, leurs projets pourront au bout du compte être très différents.

Une autre différence entre un projet et un exercice est que, dans le premier cas, les élèves peuvent utiliser des notions qu'ils maîtrisent mal. C'est souvent un point d'incompréhension entre les enseignants d'informatique et ceux des autres sciences et techniques : il n'est nullement nécessaire de maîtriser les notions de point, de vecteur, de coordonnée ou de repère pour localiser un pixel sur un écran.

Au contraire, le projet consistant à dessiner un carré sur l'écran d'un ordinateur ou, plus tard, un cube en perspective est une excellente occasion de découvrir partiellement les notions de coordonnée ou de projection centrale, et surtout de leur donner un sens aux yeux des élèves, car nous n'apprenons jamais mieux que quand nous apprenons dans le but d'utiliser ce que nous apprenons. Ces notions devront bien entendu, par la suite, être généralisées et consolidées, mais l'essentiel du travail sera fait.

Même s'il ne vise pas à faire produire par les élèves des connaissances nouvelles, l'enseignement par projet présente plusieurs similarités avec l'activité de recherche. Un chercheur définit lui aussi ses objectifs à la fois à partir d'éléments qui ne dépendent pas de lui, l'état de l'art, et d'autres qui dépendent de lui, sa créativité. Ensuite, le chercheur fait lui aussi évoluer ses objectifs en fonction des aléas du déroulement de ses travaux. Enfin, il utilise, lui aussi, des connaissances qu'il maîtrise mal, qu'il s'agisse de connaissances établies qu'il apprend au fur et à mesure de ses besoins ou des connaissances mêmes qu'il construit et qui sont donc encore en partie mal définies et conjecturales. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE RENTRÉE

DURÉE LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	4,90€ PAR MOIS	5,75€ PAR MOIS	7,40€ PAR MOIS

Au lieu de
6,50€
par mois

Au lieu de
8,20€
par mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG19REN

1 Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE PAPIER • 12 n° du magazine papier 4,90€ PAR MOIS DPV4E90	☐ FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE • 12 n° du magazine papier • 4 Hors-série papier 5,75€ PAR MOIS PPV5E75	☐ FORMULE INTÉGRALE • 12 n° du magazine (papier et numérique) • 4 Hors-série (papier et numérique) • Accès illimité aux contenus en ligne 7,40€ PAR MOIS PV7E40
---	---	--

2 Mes coordonnées

Nom :
 Prénom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :
 Tél. :
 E-mail :@.....
 (indispensable pour la formule intégrale)
 J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2020 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site: <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

3 Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :
 (Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :
 Adresse :
 Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier: Pour la Science
 170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
 N° ICS FR92ZZZ426900
 N° de référence unique de mandat (RUM)

4 MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

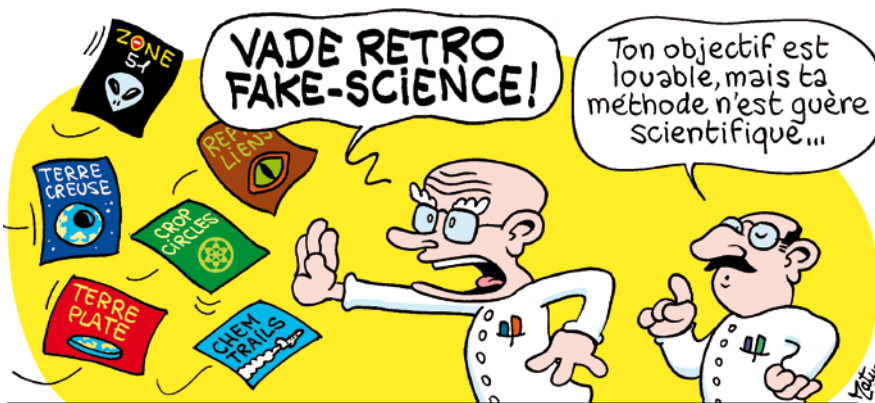
Partie réservée au service abonnements. Ne rien inscrire



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

COMMENT DÉFENDRE LA SCIENCE?

Face à la prolifération de thèses fantaisistes, plusieurs collectifs, tels que NoFakeScience, militent en faveur de la rationalité scientifique. Un exercice délicat !



Composé d'une vingtaine de jeunes spécialistes en informatique, génie nucléaire, chimie, bio-ingénierie et communication scientifique, le collectif NoFakeScience a réussi un coup médiatique. Sa tribune fondatrice «La méthode scientifique oubliée dans les médias» est parue le 14 juillet dernier dans le quotidien québécois *Le Soleil*, avant d'être reprise par différents titres francophones: *L'Opinion*, *La Libre Belgique*, *Heidi News*...

En lançant un cri d'alerte sur le traitement médiatique de la science, accusé de déformer de façon sensationnaliste le travail des chercheurs et les faits scientifiques, ce collectif appelle à «une profonde remise en question de toute la chaîne de l'information». L'appel a agrégé plusieurs milliers de signatures en quelques jours et encore plus d'abonnés sur leur compte Twitter. Démonstration est ainsi faite d'une nouvelle Bastille à prendre pour devenir des citoyens éclairés à l'ère numérique.

Cette lutte est pourtant loin d'être gagnée. L'étude des biais cognitifs en

psychologie sociale montre que le cerveau privilégie les informations les plus spectaculaires. Dans les espaces numériques, ce sont hélas ces contenus qui recueillent le plus de clics, de *likes* et de requêtes. Comme l'a souligné le sociologue Dominique Cardon dans son essai *Culture numérique* (2019), la hiérarchisation des savoirs sur le Web résulte de la

L'engagement en faveur de la science porte une contradiction dans les termes

valorisation par les algorithmes des contenus les plus populaires. Ce n'est donc pas la démonstration scientifique qui emporte la conviction sociale.

Mais défendre l'esprit critique ne se limite pas au contenu ni à la circulation de l'information. Le défi est autrement

acrobatique, car il suppose de dépasser une contradiction épistémologique inhérente au militantisme scientifique. À ce titre, le succès du collectif NoFakeScience est riche d'enseignement.

Par définition, militer vise à faire triompher une cause, c'est-à-dire à constituer un intérêt particulier en préoccupation collective. De son côté, la rationalité scientifique ne relève pas d'une négociation des valeurs. Sa légitimité est liée à son indépendance vis-à-vis des particularités culturelles, religieuses et idéologiques. C'est pourquoi l'identité sociale du savant repose sur la qualité et l'universalité de ses démonstrations scientifiques plutôt que sur sa capacité à conquérir des publics.

L'engagement en faveur de la science porte ainsi une contradiction dans les termes: face au succès de propos fantaisistes, il s'agit de convaincre de la véracité d'énoncés scientifiques à l'aide d'une rhétorique et de leviers d'action relevant du militantisme. La visée est double: à la fois assurer la véracité des propos exprimés et conquérir l'attention des publics. Cela nécessite de se déplacer sur le terrain inconfortable de la guerre des opinions sans oublier celui du raisonnement scientifique. L'exercice est délicat. Il suppose d'articuler la légitimité scientifique au combat démocratique sans confondre ces deux manières de créer de la confiance.

En décembre 2017, une tribune réunissant une longue liste de journalistes et de scientifiques titrait: «Les fausses informations scientifiques sont des "fake news" comme les autres». En février 2018, l'appel «La culture scientifique est à reconquérir» lancé dans le *Huffington Post* et parrainé par des scientifiques, dont des Prix Nobel, des gardiens de nos institutions politiques et de la culture scientifique montrait le caractère structurel et partagé de cet enjeu. En mobilisant un large périmètre de signataires représentatif de ce combat démocratique, le collectif NoFakeScience est parvenu à transformer ce constat en une forte mobilisation collective qui n'attend plus que ses Bastilles à prendre. ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

S'ABONNER
À INSECTES



Une revue trimestrielle à la portée de tous, avec différentes approches.

VISITER
LA PLUS ORIGINALE
MAISON DES INSECTES !

1 ENTRÉE OFFERTE
SUR PRÉSENTATION
DE CE MAGAZINE

À Carrières-sous-Poissy (78), une magnifique muséographie mise en valeur par de vrais insectes - des papillons aux grillons - et nos animateurs.

PÉRIODE SCOLAIRE	VACANCES SCOLAIRES (ZONE C)
Mercredi et samedi de 14h à 18h	Du mardi au samedi de 14h à 18h

TOUTE L'ANNÉE
Le 3^e dimanche du mois de 11h à 18h
Sauf pendant les vacances scolaires

WWW.INSECTES.ORG

Notre association est la porte-parole d'environ 50 000 espèces à 6 pattes !

Et si vous aussi apportiez votre soutien ?

L'Opie est une association nationale qui agit pour tous les insectes, via la connaissance entomologique, la protection des milieux et la sensibilisation. L'association étudie et fait connaître ces animaux sous tous leurs aspects en rassemblant curieux, passionnés et experts. Elle œuvre pour une meilleure prise en compte des insectes dans les politiques publiques et dans nos vies de tous les jours.

L'ESSENTIEL

> Plusieurs études, en particulier celle dite de Krefeld, en Allemagne, indiquent que les insectes sont en déclin rapide à l'échelle mondiale.

> Ces études, encore trop peu nombreuses, se font grâce au concours essentiel d'amateurs ayant acquis une grande expertise.

> Les facteurs du déclin des insectes sont multiples : raréfaction et appauvrissement des habitats, utilisation massive d'engrais et de pesticides, réchauffement climatique...

L'AUTEUR



JOSEF SETTELE
agrobiologiste au centre Helmholtz pour la recherche environnementale à Halle, en Allemagne, et professeur d'écologie à l'université Martin-Luther de Halle-Wittenberg

Les insectes en chute libre



Les abeilles domestiques ne sont pas autant menacées d'extinction que les insectes sauvages, mais elles subissent aussi les altérations de l'écosystème, notamment l'emploi croissant de pesticides.

Les populations d'insectes s'effondrent, même dans les réserves naturelles, révèle une étude réalisée en Allemagne. Un constat alarmant, qui semble valable pour bien d'autres régions dans le monde.

Des pertes massives de vie végétale et animale sont en cours. Les chercheurs les signalent depuis longtemps, mais sans guère attirer l'attention. Il est une découverte cependant, qui a fait la une des journaux de par le monde: la disparition dans les réserves naturelles du nord-ouest de l'Allemagne des trois quarts de la biomasse des insectes volants!

L'ÉTUDE DE KREFELD, PROUESSE DE CHERCHEURS BÉNÉVOLES

Connue sous le nom d'« étude de Krefeld », la recherche en question fut publiée sous la supervision de l'écologue Caspar Hallmann, de l'université Radboud, à Nimègue, aux Pays-Bas, et se fonde sur les données du biologiste Martin Sorg et de ses collègues de la Société entomologique de la ville de Krefeld, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. En 2013, ces chercheurs bénévoles avaient déjà fait connaître de premiers résultats qui résultaient d'un travail lancé en 1989, lorsqu'ils mirent en place, en de nombreux sites de Rhénanie-du-Nord-Westphalie et d'ailleurs, des « pièges Malaise ».

Mises au point par l'entomologiste suédois René Malaise, mort en 1978, ces sortes de tentes sont disposées de telle sorte que les insectes entrent par une ouverture, sont attirés par la lumière venant du haut et, là, finissent dans un récipient d'alcool, où ils sont conservés. Ces pièges interceptent ainsi mouches, moustiques, abeilles, guêpes, papillons et tous



insectes volants suivant un même processus normalisé (voir l'encadré page ci-contre).

Pour comprendre l'impact du travail des entomologistes de Krefeld, il faut avoir à l'esprit que dans l'étude d'une population d'insectes, deux aspects fondamentalement différents sont à distinguer: d'une part les effectifs, d'autre part la biodiversité. Pour analyser les premiers, on suit les évolutions de la biomasse, c'est-à-dire de la masse de tous les individus du groupe étudié. Pour la seconde, on examine les changements dans la variété et dans les fréquences des espèces présentes.

DONNÉES SUR LA MASSE ET MASSES DE DONNÉES

Par ailleurs, afin d'évaluer de quelles façons les évolutions de la population affectent les écosystèmes, on a également besoin de données caractérisant la situation des insectes dans leur ensemble. Par exemple, pour estimer les impacts sur la pollinisation ou la lutte contre les ravageurs biologiques, il faut des données sur les nombres d'individus adultes, des abeilles ou des guêpes ichneumons. Et lorsqu'il s'agit du cycle des nutriments, de la décomposition de la matière organique ou de la base alimentaire dont disposent les animaux insectivores, nous avons de même besoin de données sur les nombres de larves, de nymphes, de juvéniles... bref sur le nombre d'individus à chaque stade de développement.

Les recherches antérieures à l'étude de Krefeld portaient avant tout sur la variété des

Un piège Malaise est constitué par une tente dans laquelle des insectes, entrés fortuitement, sont attirés vers le haut par la lumière et finissent dans un récipient rempli d'alcool, où ils sont conservés.

espèces, l'accent étant mis sur l'évolution de certaines d'entre elles, afin d'estimer si elles étaient en danger et ce qu'il fallait faire pour les protéger. Les données sur la biomasse et la composition des populations par stade faisaient le plus souvent défaut. Une lacune importante sachant que par exemple 70% des chauves-souris et 60% des oiseaux sont insectivores... Et que les insectes pollinisent près de 90% des plantes à fleurs du monde, dont 75% des plantes cultivées importantes. Il est d'ailleurs possible d'assigner une valeur monétaire au travail de pollinisation effectué par les insectes: entre 235 et 577 milliards d'euros par an, a-t-on calculé...



Sur une colline des environs de Ratisbonne, le nombre d'espèces est passé en deux siècles de 171 à seulement 71

Même si cela n'était pas prévu lorsqu'elle fut lancée, l'étude de Krefeld est la première qui commence à combler cette lacune grâce à ses données sur la biomasse totale des insectes. En outre, avant elle, peu de recherches ont exploité des données prélevées pendant plus de quinze ans, alors qu'elle couvre une période de vingt-sept ans.

Ses résultats sont alarmants à deux égards : d'une part, l'équipe de Martin Sorg a mis en évidence un effondrement considérable de la biomasse totale d'insectes volants ; d'autre part, les chercheurs ont fait cette constatation au sein de réserves naturelles, des zones censées préserver la nature !

On savait déjà qu'en Allemagne, la population d'insectes a davantage diminué au cours des dernières décennies que celle des plantes ou des oiseaux. Pour autant, le déclin mis en évidence par l'étude de Krefeld est beaucoup plus important que ne le suggéraient les raréfactions d'espèces constatées jusque-là au sein de réserves naturelles : la biomasse d'insectes volants a diminué de 76%, et même de 82% pendant les mois d'été, saison où les insectes sont les plus actifs et les adultes volants les plus nombreux (voir l'encadré ci-contre, graphique du haut). Par exemple, dans la réserve naturelle d'Orbroicher Bruch, près de Krefeld, la masse d'insectes collectée en douze mois est passée de 1,5 kilogramme en 1989 à moins de 300 grammes en 2013...

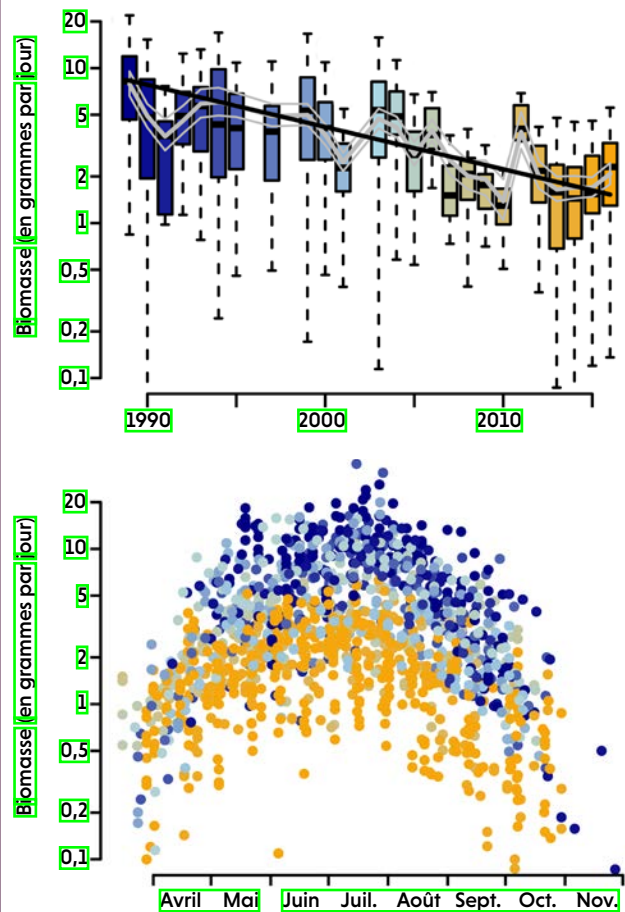
LES PAPILLONS, UN CAS EMBLÉMATIQUE ET SIGNIFICATIF

Précisons l'impression créée par cette chute de la biomasse d'insectes volants en nous concentrant sur un groupe emblématique : les papillons. Sa situation s'évalue en effet très bien à partir des données disponibles, alors que ce groupe, de par les faibles capacités de dispersion de ses espèces, la brièveté de leurs cycles de vie et leur grande sensibilité aux conditions environnementales, rassemble des bio-indicateurs particulièrement efficaces des changements environnementaux.

En collaboration avec la Société pour la protection des papillons (Gesellschaft für Schmetterlingsschutz), le centre Helmholtz pour la recherche environnementale dont je fais partie coordonne depuis 2005 le « Système allemand de suivi des papillons » (Tagfalter-Monitoring Deutschlands). Ce projet – le seul système allemand d'observation systématique à long terme d'insectes – relève de la science participative. Année après année, des citoyens bénévoles observent, lors d'inspections hebdomadaires ou bihebdomadaires, tous les papillons qu'ils rencontrent le long de routes définies et les enregistrent. Les données de population qui en résultent

LE DÉCLIN DES INSECTES VOLANTS EN ALLEMAGNE

Depuis 1989, les entomologistes de Krefeld ont noté une diminution d'environ 80 % de la masse d'insectes pris dans leurs pièges Malaise (graphique du haut). Les barres colorées représentent les fluctuations dans les mesures, les lignes grises indiquent la tendance une fois que l'on a pris en compte les effets de la météo et du type de paysage ou d'habitat. La droite noire résume la tendance générale. Les pertes de biomasse se produisent surtout pendant les mois d'été (graphique du bas). Dans les deux graphiques, les variations de couleur indiquent l'année et vont du bleu (1989) à l'orange (2016).



documentent au niveau local, régional et national, l'évolution des populations de papillons, d'une façon qui permet la comparaison avec les données acquises dans d'autres pays européens.

Jusqu'en 2016, les données suggèrent une légère augmentation peu significative du nombre de papillons observés en Allemagne. Des observations similaires ont été faites pour la Suisse pour la période 2003-2016. Si l'on fait l'hypothèse raisonnable que les papillons ont tous à peu près la même masse, cela implique une légère augmentation de la biomasse de papillons. Or, de son côté, l'étude de

➤ Krefeld suggère une chute de plus de 40% de la biomasse des insectes volants sur une période équivalente (à partir de 2005), de sorte que les données sur les papillons semblent la contredire.

Mais ce n'est pas vraiment le cas. Contrairement au Système allemand de suivi des papillons, l'étude de Krefeld ne porte pas uniquement sur les papillons, mais sur la biomasse de tous les insectes volants dans les réserves naturelles (mouches et autres diptères, guêpes et autres hyménoptères, etc.). Le calcul de la moyenne des tendances espèce par espèce amène à la conclusion que, dans l'ensemble, les papillons ont diminué de 11% en Allemagne. Cette constatation n'empêche pas que la biomasse des papillons ait pu augmenter dans certaines régions allemandes, tandis qu'elle aurait baissé du côté de Krefeld...

DES RÉSULTATS SIMILAIRES AUX PAYS-BAS

Un chiffre venu des Pays-Bas voisins va dans le même sens : l'échantillonnage des populations de papillons dans chaque type d'habitat, suivi d'un calcul tenant compte des proportions de ces différents habitats, mène à la conclusion que la biomasse de lépidoptères a chuté de 47% entre 1992 et 2016. De même, les évolutions de l'« indicateur européen des papillons des prairies », indicateur

défini à partir des tendances au sein de 17 espèces de papillons de prairies, permettent peut-être une meilleure vue de la tendance d'ensemble. Or d'après son évolution, la population européenne des papillons de prairie a diminué d'un tiers entre 1990 et 2015 (voir l'encadré ci-dessous).

LE SUIVI CLASSIQUE DES POPULATIONS EST INSUFFISANT

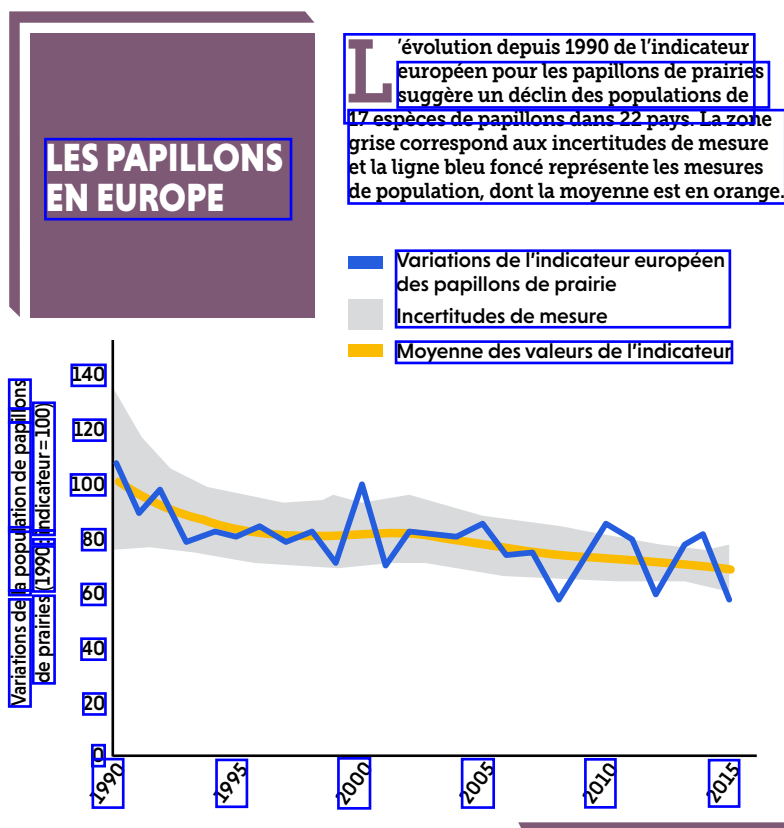
Pourquoi le système traditionnel de suivi des populations n'a-t-il pas alerté sur l'ampleur de la chute de la biomasse ? Parce qu'il n'a pas été conçu dans cet objectif, mais pour établir des listes rouges, qui recensent les plantes et les animaux menacés d'extinction. Depuis longtemps, les espèces menacées d'extinction sont placées sur des listes rouges. On les y range en dix catégories, d'après les appréciations collectives de comités de naturalistes amateurs qui connaissent les espèces en question ; leurs situations sont résumées par les étiquettes « en déclin », « en augmentation » ou « stable », appréciations qui sont attribuées d'après des critères standardisés. Il résulte de l'organisation de ce processus que les espèces les mieux documentées sont avant tout celles qui sont mieux connues des experts bénévoles.

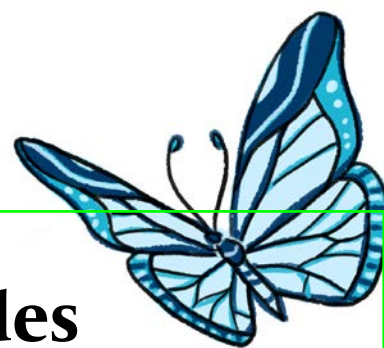
Ce travail précieux se poursuit et tous les dix ans, en Allemagne, les coordinateurs centraux et de nombreux experts bénévoles collaborent sous les auspices de l'Office fédéral de protection de la nature (BfN ou Bundesamt für Naturschutz) afin d'établir les listes rouges nationales. Dans leur état actuel, elles donnent les tendances à long terme des populations de 7444 espèces d'insectes sur une période pouvant aller jusqu'à 150 ans. Il en ressort que 44% de ces espèces ont vu leurs populations diminuer, 41% sont restées stables et seulement 2% ont augmenté.

En plus des tendances à long terme, il est aussi possible d'estimer les tendances à court terme sur une période de dix à vingt-cinq ans. Les cas des abeilles et des papillons montrent ainsi que les espèces rares sont particulièrement en déclin, alors que les espèces communes semblent encore bien se porter. Si l'on fait la synthèse des tendances à court et long termes en Allemagne d'après les listes rouges, 42% des espèces d'insectes doivent être considérées comme menacées d'extinction.

Une chose est claire : malgré leurs défauts, les listes rouges resteront le principal instrument d'évaluation des menaces pesant sur la survie des espèces, tant qu'il n'existera pas assez d'études fondées sur l'observation d'une population pendant de longues périodes.

A cet égard, signalons l'une des très rares études de l'évolution à long terme d'une population d'insectes. L'équipe de l'écologue Jan





Christian Habel, de l'université technique de Munich, a restitué à partir de sources historiques datant d'entre 1840 et 2013 l'évolution des communautés de papillons d'un versant de colline des environs de Ratisbonne, donc sur presque deux siècles. Il en ressort que la diversité de cette population de papillons a beaucoup évolué: le nombre d'espèces est passé de 117 à seulement 71. Les espèces qui se sont le plus raréfiées sont aussi les plus spécialisées – celles qui ont des besoins particuliers, par exemple qui ont une nourriture bien précise. De fait, ce sont surtout les espèces peu expansives, celles qui se suffisent d'habitats pauvres en ressources, qui ont décliné le plus. La plupart d'entre elles font partie des espèces menacées aujourd'hui, tandis que les espèces généralistes – celles qui ont des exigences moins particulières – ont prospéré.

LA BIODIVERSITÉ DES PAPILLONS RESTE PLUS GRANDE DANS LES RÉSERVES NATURELLES

Depuis que les entomologistes de Krefeld ont collecté leurs données dans des réserves naturelles, deux questions se posent: les aires protégées remplissent-elles encore assez leur fonction? Comment la biomasse des insectes évolue-t-elle dans les écosystèmes non protégés? L'étude de Krefeld n'y répond pas. Pour ce faire, il importerait de savoir quelles espèces sont touchées. Seule une détermination détaillée des espèces et de leurs besoins biologiques permettra d'obtenir des résultats précis à cet égard; ce qui, pour des raisons de coût, n'a pas été possible jusqu'à présent.

En 2019, avec Stanislav Rada, qui poursuit ses recherches à l'université d'Olomouc, en

Aux Pays-Bas, la biomasse des papillons a chuté de 47 % entre 1992 et 2016

Parmi les coléoptères, le principal groupe d'insectes avec plus de 350 000 espèces connues, on trouve de nombreux pollinisateurs, telle cette cétoine dorée (*Cetonia aurata*).

Tchéquie, nous avons publié notre propre étude de la biodiversité des papillons en Allemagne. Comme on pouvait s'y attendre, nous avons constaté qu'elle est plus grande dans les zones protégées de statut Natura 2000 qu'en dehors de ces zones, et que plus on s'en éloigne, plus cette diversité diminue.

L'évaluation des données du Système allemand de suivi des papillons montre aussi que la diversité des espèces a diminué de 10 % en onze ans, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des réserves naturelles. Ainsi, les zones protégées n'enrayent pas la baisse générale de la biodiversité des papillons; ou, pour le dire autrement: le déclin des papillons de réserves naturelles reflète l'évolution générale. Et la biomasse des insectes volants des zones protégées peut avoir déjà atteint un faible niveau, même si la biodiversité y reste grande. Dans ce cas, la situation dans les zones non protégées est peut-être encore pire!

LES FACTEURS POSSIBLES DE DÉCLIN SONT MULTIPLES

Pourquoi les insectes disparaissent-ils? Nous n'avons pas encore de certitudes, tant il est difficile d'analyser le changement au sein de systèmes aussi complexes que nos paysages, créations conjointes de l'humanité et de la nature. Les entomologistes de Krefeld ont bien évoqué plusieurs explications naturelles possibles – évolution des précipitations, de la température, de la couverture végétale... –, mais ils n'ont fait que mettre en évidence des corrélations entre des phénomènes et non des relations de cause à effet. Et leurs résultats, faute de données, ne disent rien sur les rôles de l'usage des sols, des pesticides et des engrais... Cette étude ne permet donc pas de conclure sur l'impact de l'agriculture intensive et des modifications des paysages, même si une relation avec le déclin des insectes est probable.

C'est d'ailleurs ce que semble confirmer l'IPBES, la Plateforme intergouvernementale



LE DÉCLIN DES OISEAUX TRADUIT CELUI DES INSECTES EN FRANCE



L'étourneau sansonnet (*Sturnus vulgaris*) est une espèce de passereau omnivore, mais principalement insectivore et frugivore. Hautement social, il forme des nuées mouvantes dans le ciel.

Pour nous avertir du déclin de la biodiversité, les chercheurs nous ont surtout parlé du risque de disparition des espèces remarquables. C'est aux « espèces menacées » que l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) consacre depuis soixante ans sa « Liste rouge » annuelle. Quant aux insectes, lorsqu'on s'y intéressait, il en allait de même : c'est l'espèce rare que l'on recherchait, et, en Allemagne, les campagnes de piégeage organisées par la société entomologique de Krefeld, avant sa désormais célèbre publication, se bornaient à constater la présence ou l'absence de telle libellule ou de tel papillon sur un territoire.

Le travail réalisé par les entomologistes de Krefeld n'a acquis son importance majeure que parce qu'en 1989, presque fortuitement, quelqu'un a eu l'idée de compléter les inventaires d'espèces en pesant la totalité des insectes volants capturés. C'est seulement parce que, pendant vingt-sept ans, les mêmes pièges sont restés aux mêmes endroits, où l'on a pesé l'ensemble des prises, que l'effondrement des populations d'insectes est apparu avec netteté !

En France, on ne dispose malheureusement pas de chiffres comparables, et nous manquons de références anciennes auxquelles comparer des résultats actuels. Pour autant, pouvons-nous douter qu'il y a aujourd'hui beaucoup moins d'insectes ? Au cours de longs trajets en voiture, nous ne nettoyons presque plus notre pare-brise, alors qu'il fallait il y a vingt ou trente ans s'arrêter régulièrement pour laver la bouillie qui l'enscrasait. En fait, il n'y a aucune raison

d'ailleurs pour que la situation ne soit pas, ici, aussi inquiétante que chez nos voisins allemands : l'intensification des pratiques agricoles, en particulier l'utilisation de pesticides est chez nous encore plus marquée que chez eux.

Si, pour les insectes, nous devons nous contenter d'approximations, nous en savons beaucoup plus sur les oiseaux. En 1989, le Muséum national d'histoire naturelle a mis en place, en partenariat avec de nombreuses autres instances scientifiques, et en s'appuyant sur tout un réseau de bénévoles, issus souvent d'associations comme la LPO (Ligue pour la protection des oiseaux), un programme de « suivi temporel des oiseaux communs » (Stoc).

Pour les insectes, nous devons nous contenter d'approximations, mais nous en savons beaucoup plus sur les oiseaux

Le 20 mars 2018, le Muséum et le CNRS ont publié ensemble des résultats sans ambiguïtés : d'après le Stoc, ces quinze dernières années, si les effectifs globaux des oiseaux forestiers et des oiseaux opportunistes (qu'on rencontre un peu partout, comme le merle noir ou la mésange charbonnière) sont à peu près stables, les populations d'oiseaux des campagnes ont, elles, diminué d'un tiers.

Avec son équipe du CNRS, Vincent Bretagnolle a vu depuis 1995 s'effriter toutes les populations d'oiseaux dans le territoire agricole ordinaire de la

zone-atelier qu'il pilote dans les Deux-Sèvres. L'alouette, par exemple, a perdu un tiers de ses effectifs ; les perdrix, 80 %. Toutes les espèces sont concernées, même celles, forestières et opportunistes, qui sont stables au niveau national. Cette diminution générale, constatée en milieu agricole, est certainement en lien avec l'effondrement des insectes, que les insecticides tuent ou perturbent, et que les herbicides privent d'abri et de nourriture. La plupart des oiseaux ont besoin d'insectes pour se nourrir, au moins au stade juvénile.

La crise qui frappe aujourd'hui la biodiversité ne se manifeste pas seulement par l'accélération du rythme des extinctions d'espèces. Elle se caractérise aussi par un effilochage général, un effritement de tout le tissu vivant de la planète. Des espèces familières, présentes dans notre paysage quotidien ne paraissent pas menacées. Pas encore. Elles sont simplement trois fois, quatre fois moins nombreuses qu'il y a trente ans.

Il ne suffira pas, pour enrayer la crise, de classer 5 % ou même 10 % du territoire en parc naturel ou en réserve, de suivre attentivement et de protéger par la réglementation quelques centaines ou quelques milliers d'espèces particulièrement menacées. Nous ne comprendrons, pour tenter de l'enrayer, l'érosion qui affecte toutes les composantes du vivant que si nous nous y mettons tous. C'est l'objet des programmes de science citoyenne, mobilisant des milliers de bénévoles, que coordonne le Muséum sous l'appellation générale de « Vigie Nature ». Nous y avons tous notre place !

FRANÇOIS LETOURNEUX
Vice-président du comité français de l'UICN

Beaucoup de chercheurs citoyens sont des experts du suivi des papillons

sur la biodiversité et les services écosystémiques. Cet organisme a cherché à mettre en évidence les facteurs de risque qui pèsent sur les insectes pollinisateurs en compilant les milliers de publications scientifiques qui leur sont consacrées. Un groupe international de près de 100 experts, soutenu par des centaines d'autres experts issus d'institutions de recherche, d'entreprises privées et d'organisations non gouvernementales, a analysé les connaissances sur la pollinisation et la production alimentaire afin de suggérer comment améliorer la situation des pollinisateurs et des insectes.

AGRICULTURE INTENSIVE, FAUCHAGES ABUSIFS, URBANISATION...

Selon leur rapport paru en 2016, de très nombreuses études de terrain indiquent que l'agriculture intensive menace le nombre, la diversité et la santé des insectes, donc leur capacité de pollinisation. Certes, sous les latitudes tempérées d'Europe centrale, l'agriculture a toujours eu une influence considérable sur la vie naturelle. De nombreuses espèces animales et végétales se sont adaptées à nos paysages culturels; certaines s'y sont aussi installées grâce à l'agriculture et à la sylviculture. Mais lorsque l'usage des sols évolue, que ce soit parce qu'il s'intensifie ou par abandon, la diversité des paysages en question se réduit.

Les grandes monocultures d'aujourd'hui, pauvres en espèces et où les herbes sauvages sont systématiquement supprimées, impliquent que seulement quelques espèces d'insectes peuvent y survivre. Les fauchages fréquents et intenses et les labours répétés affectent aussi le monde animal. De plus en plus d'habitats sont en outre détruits par l'urbanisation et par la construction de routes. Les réserves naturelles ne s'étendent le plus souvent que sur de petites zones qui, telles des îles, sont entourées de terres exploitées. Il en résulte un isolement qui prive les populations d'insectes d'échanges génétiques.

Autres accusés: les intrants chimiques. Les pesticides et les molécules issues de leur dégradation s'accumulent dans le sol et les eaux. Parmi eux, les néonicotinoïdes utilisés contre les ravageurs altèrent le système nerveux des abeilles, de sorte qu'ils sont particulièrement controversés (en 2018, la Commission européenne en a d'ailleurs interdit trois). Par ailleurs la fertilisation intensive et les gaz d'échappement des voitures augmentent la proportion d'azote dans le sol, ce qui, à son tour, a un impact sur les chenilles de papillons préférant des plantes ayant besoin de moins d'azote.

LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT DIFFICILES À APPRÉCIER

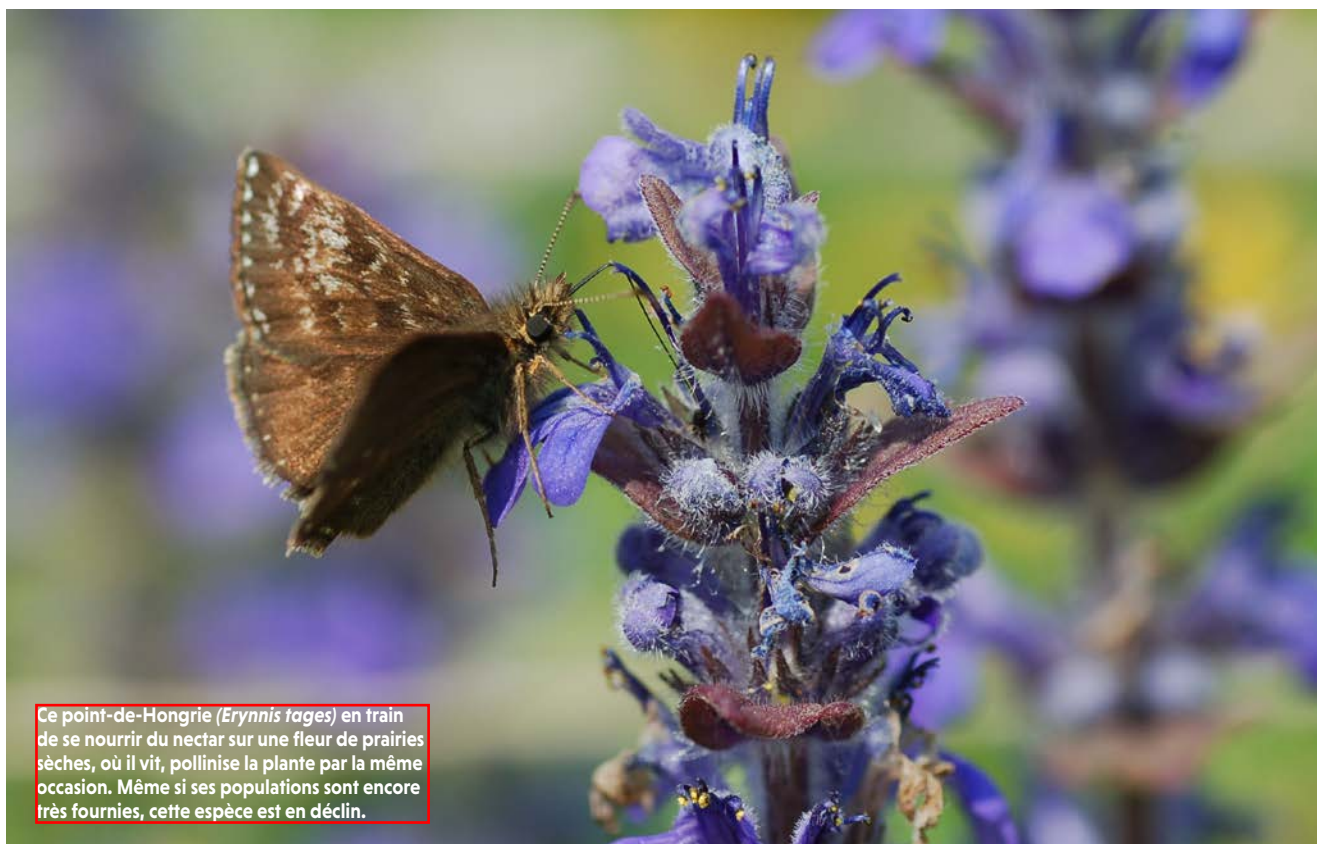
Il ne faut pas oublier que des facteurs biologiques jouent aussi un rôle. Les abeilles mellifères, par exemple, sont parfois infestées par des parasites introduits comme l'acarien *Varroa*. Il arrive également que des plantes exotiques importées se multiplient et évincent les espèces locales essentielles pour la survie des insectes européens et de leurs larves.

DE L'UTILITÉ DES CHERCHEURS AMATEURS

Sans le patient travail d'amateurs passionnés, nous ne connaîtrions pas aussi bien la situation des insectes. Ce sont ainsi les entomologistes bénévoles de Krefeld qui ont révélé le fait essentiel d'un déclin général des populations d'insectes. Leur travail et les quelques études à long terme dont nous disposons ont prouvé l'utilité des captures systématiques d'insectes: il est désormais clair que pour pouvoir discerner des tendances, il est essentiel de les pratiquer pendant des périodes de plus de dix ans. Ce n'est qu'ainsi que l'on obtient des informations fiables sur les évolutions des populations d'insectes, que l'on peut analyser leurs principales causes et mesurer leurs

impacts sur les écosystèmes. Les amateurs jouent un rôle crucial dans le suivi et la protection des insectes. Ils participent à l'évaluation des populations et à l'établissement des listes rouges. En dépit de tous ces apports importants, nombre d'entomologistes professionnels ont d'abord méprisé le travail essentiel de ces « chercheurs amateurs », nombreux à avoir un diplôme universitaire et une grande expertise des papillons ou d'autres insectes. Alors, disons-le carrément: sans les bénévoles, nous ne saurions presque rien sur notre flore et sur notre faune. C'est pourquoi il faut d'urgence mettre en place en Europe un système normalisé de suivi de populations d'insectes. Pour le rendre efficace, le travail des bénévoles doit se poursuivre, et ces « scientifiques citoyens » doivent pouvoir compter sur le soutien des chercheurs professionnels. Quand les évaluations à réaliser deviennent complexes sur le plan statistique, le bénévolat atteint en effet ses limites.

J. S.



Ce point-de-Hongrie (*Erynnis tages*) en train de se nourrir du nectar sur une fleur de prairies sèches, où il vit, pollinise la plante par la même occasion. Même si ses populations sont encore très fournies, cette espèce est en déclin.

Le changement climatique devrait aussi poser à terme des problèmes de plus en plus graves, mais ce n'est pas facile à analyser. Ainsi, il est possible que de nombreux insectes bénéficient de l'arrivée de températures plus élevées. Mais ces dernières conduiront parfois à une végétation plus dense, ce qui, en combinaison avec un apport accru d'azote, aura plutôt un effet refroidissant pour le microclimat.

NOUS EN SAVONS BIEN ASSEZ POUR AGIR

Pour autant, malgré les incertitudes qui les entourent, les menaces qui pèsent sur les insectes sont suffisamment avérées pour que nous agissions. À cet égard, le rapport IPBES recommande des stratégies pour améliorer les conditions de vie des pollinisateurs et des nombreux autres insectes, et pour sécuriser ainsi notre production alimentaire. La liste va des mesures immédiates de réduction des risques (comme l'interdiction de certains intrants de synthèse) aux processus complets et à long terme de transformation de l'usage des sols. Par exemple, par la présence de bandes fleuries le long des terres cultivées afin de fournir du nectar aux insectes, ou la promotion de méthodes de culture diversifiées afin de réduire l'abus de monocultures.

L'agriculture, la sylviculture, l'aménagement paysager et la planification environnementale

BIBLIOGRAPHIE

S. Rada et al., Protected areas do not mitigate biodiversity declines : A case study on butterflies, Diversity and Distributions, vol. 25(2), pp. 217-224, 2019.

C. A. Hallmann et al., More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas, PLOS ONE, vol. 12, e0185809, 2017.

J. C. Habel et al., Butterfly community shifts over two centuries, Conservation Biology, vol. 30, pp. 754-762, 2016.

M. Sorg et al., Ermittlung der Biomassen flugaktiver Insekten im Naturschutzgebiet Orbroicher Bruch mit Malaise Fallen in den Jahren 1989 und 2013, Mitteilungen aus dem Entomologischen Verein Krefeld, vol. 1, pp. 1-5, 2013.

sont tous concernés par la question de la protection des insectes. Et la façon dont nous gérons nos balcons et nos jardins a aussi un impact. Plutôt que d'y installer des plantes exotiques d'origine lointaine, prenons conscience que les plantes européennes fournissent plus de nectar aux abeilles sauvages. Des «hôtels à insectes», disponibles à l'achat ou construits soi-même, favorisent la nidification des insectes en leur apportant un refuge. Si, dans votre jardin, vous faites le choix de laisser vivre les orties et autres «mauvaises herbes», vous laisserez aux papillons une chance de se reproduire. Et surtout, les jardiniers doivent enfin se demander s'ils ont vraiment besoin de pesticides de synthèse...

Il ne s'agit pas de faire des agriculteurs ou d'autres acteurs sociaux les seuls responsables de la situation. Chacun peut contribuer à la préservation des insectes afin de prévenir l'effondrement écologique qui menace si leur déclin devait se poursuivre. En Allemagne et dans d'autres pays comparables tels que la France, la mise en réseau de nombreuses contributions, celles des chercheurs bénévoles notamment, aiderait à mettre un terme au déclin des insectes, voire à renverser la tendance. L'enjeu n'est pas uniquement la production alimentaire liée aux pollinisateurs; il est aussi de sauvegarder l'abondance et la fascinante diversité d'un groupe animal qui nourrit les écosystèmes... et notre imaginaire. ■

OFFRE DÉCOUVERTE

Abeilles et Fleurs

Valable
jusqu'au
31 octobre
2019

La seule revue syndicale apicole de France
5 numéros pour 15 € seulement !

Ils ont la passion des abeilles ? Faites découvrir
à vos amis la revue de l'apiculture « Abeilles et Fleurs »
à un prix « découverte » exceptionnel !

Pour enrichir vos connaissances
et améliorer votre technique,
au sommaire chaque mois :

■ Actualité ■ Conseils pratiques ■ Biologie
■ Sanitaire ■ Botanique ■ Apithérapie...

Des articles rédigés par des spécialistes,
des scientifiques éminents et reconnus.

Les 5 numéros (juillet-août, septembre,
octobre, novembre et décembre 2019)
**vous sont offerts au prix exceptionnel
de 15 € seulement ! Profitez-en vite !**



EN CADEAU DE
BIENVENUE
LE HORS-SÉRIE
« FRELON
2019-2020 »
(SORTIE PRÉVUE
EN OCTOBRE 2019)
**D'UNE VALEUR
DE 5 €**

OFFRE DÉCOUVERTE

Renvoyez ce bon spécial à : UNAF - 5 bis, rue Faÿs - 94160 SAINT-MANDÉ

☒ **Oui**, je profite de l'offre découverte « ABEILLES ET FLEURS » LA REVUE DE L'APICULTURE*

Veuillez faire parvenir les cinq numéros juillet-août, septembre, octobre, novembre et décembre 2019 à l'adresse suivante :

NOM : PRÉNOM : PROFESSION :

ADRESSE :

Tél. E-mail :

☒ Ci-joint mon règlement de 15 € par chèque à l'ordre de l'UNAF.

(*) Valable jusqu'au 31 octobre 2019.



JEAN-FRANÇOIS SILVAIN

est ancien directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD). Il préside depuis 2014 la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), fondation de coopération scientifique de droit privé qui a pour mission de soutenir et d'agir avec la recherche pour accroître et transférer les connaissances sur la biodiversité.



35% de nos récoltes dépendent des pollinisateurs

Visible par chacun, l'effondrement de grandes populations d'insectes menace le fonctionnement des écosystèmes et notre alimentation. Jean-François Silvain, le président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), commente ces enjeux.

Craignez-vous que les insectes disparaissent ?

Oui, bien sûr, même si tous les insectes ne sont pas soumis aux mêmes menaces. Chacun peut constater que les populations de certaines espèces liées aux humains, comme les poux ou les punaises de lit, ou celles qui exploitent nos nourritures, comme les ravageurs des cultures, ou encore celles vectrices de maladies, tels les moustiques, ne disparaissent pas, loin de là ! Dans le même temps, on sait que d'autres populations d'insectes – papillons, coléoptères, abeilles... – donnent des signes d'effondrement.

Lesquels ?

Ceux qui sont assez âgés se souviennent que dans les années 1980, un voyage sur l'autoroute obligeait à nettoyer son pare-brise toutes les quelques dizaines de kilomètres, parce qu'il se constatait tellement d'insectes écrasés que l'on ne voyait plus bien à travers. Aujourd'hui – chacun le constate – un conducteur peut franchir des centaines de kilomètres sans rencontrer ce problème : les insectes volants semblent donc avoir largement disparu.

Il ne s'agit pas là d'une constatation scientifique...

Certes, mais elle n'en est pas moins extrêmement significative si elle est faite par des centaines de millions de gens à travers toute l'Europe. Et bien entendu, les entomologistes ont aussi commencé à caractériser le phénomène à l'échelle européenne et à l'échelle mondiale.

Vous faites notamment allusion à la fameuse étude allemande de Krefeld ?

Oui, à l'analyse dirigée par Caspar Hallman, de l'université de Radboud, aux Pays-Bas, des résultats de la Société d'entomologie de Krefeld, en Allemagne. Elle nous a révélé que même dans les aires protégées allemandes, la biomasse des insectes volants a décliné des trois quarts en vingt-sept ans (*voir l'article de Josef Settele, pages 26 à 34*). C'est énorme !

Pour la situation mondiale, j'évoque de préférence la métaanalyse réalisée par Francisco Sánchez-Bayo, de l'université de Sydney, et Kris Wyckhuys, de celle de Brisbane, en Australie. Ces chercheurs ont dépouillé pas moins de 653 travaux scientifiques afin de nous proposer une vision d'ensemble de la situation des populations d'insectes à travers le monde. Leur article met clairement en évidence un déclin mondial, qui – je les cite – « pourrait conduire à l'extinction de 40 % des espèces d'insectes du monde au cours des décennies à venir. »

Vous attendiez-vous à ces constatations ?

Même si j'étais très conscient des menaces qui pèsent sur les insectes pollinisateurs, je ne m'attendais pas à voir ce constat étendu à l'ensemble des insectes, car j'étais sous l'influence des idées reçues du passé. Il y a encore trente ans, des gens

se plaisaient à dire que les insectes survivraient à l'humanité. Le règne des arthropodes était vu comme robuste, ubiquitaire et capable de résister à tout. Certains se plaisaient à vanter la résistance des blattes, capables d'endurer des radiations et de survivre à une guerre nucléaire. Tout cela n'incitait pas à penser que les activités humaines, après avoir entraîné un effondrement de populations de poissons, de mammifères marins, de vertébrés terrestres, causeraient aussi celui de grandes populations d'insectes.

Mais que se passera-t-il concrètement si les insectes deviennent rares, voire disparaissent ?

Une raréfaction sévère, voire une disparition, entraînerait l'effondrement des réseaux trophiques : en clair, de beaucoup des chaînes alimentaires dont font partie les oiseaux et mammifères insectivores, sans oublier les poissons et les amphibiens qui vivent d'insectes dans les milieux humides. Cette situation semble inimaginable, mais si les insectes disparaissaient, une très grande partie de la vie animale des milieux terrestres serait fortement affectée.

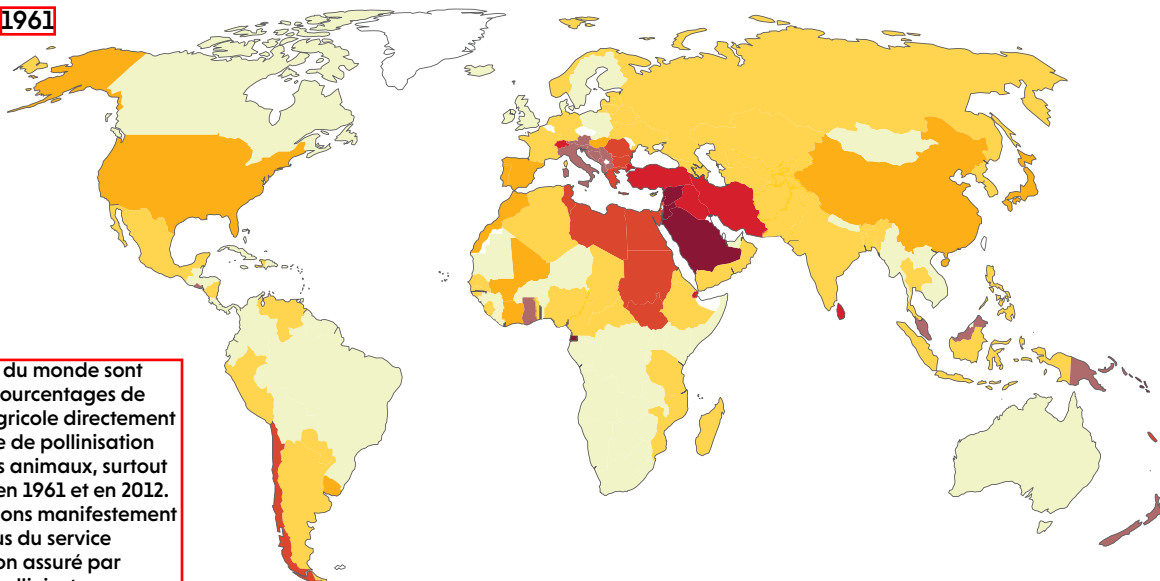
Et s'agissant de la vie végétale ?

Les conséquences seraient majeures aussi. Je me réfère là au dernier rapport sur la pollinisation et la production alimentaire de l'IPBES, la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques. Il y est rappelé que les animaux pollinisateurs – il s'agit d'oiseaux, de chauve-souris, voire de petits primates, mais surtout d'insectes volants – contribuent à la pollinisation de près de 90 % des plantes à fleurs. Pour se rendre compte de ce que cela signifie, rappelons-nous que les angiospermes, c'est-à-dire les plantes à fleurs, représentent 90 à 96 % de la biodiversité végétale ! Certes, elles pratiquent aussi l'autopollinisation et la pollinisation par le vent, mais tandis que la première ne produit pas de brassage génétique, la deuxième est plus aléatoire comparée à la pollinisation animale. Alors, si les insectes, dont les interactions avec les plantes sont multiples et ne se limitent pas à la pollinisation, disparaissaient, cela entraînerait des modifications majeures des écosystèmes terrestres, modifications dont il est difficile d'imaginer aujourd'hui l'ampleur. Mieux vaut ne pas en arriver là...

Et quelles en seraient les incidences agricoles ?

Il nous faudrait nous passer du plaisir de consommer des fruits et nous habituer à nous nourrir surtout de céréales ! Car, effectivement, toutes les récoltes ne dépendent pas de la pollinisation animale. Les céréales, par exemple, sont pollinisées *via* le vent. Pour autant, nous savons que 35 % de nos récoltes dépendent au moins en partie des pollinisateurs, à commencer par les insectes. Concrètement, cela signifie que les productions de près d'une centaine de fruits, graines

1961



Sur ces cartes du monde sont reportés les pourcentages de production agricole directement dus au service de pollinisation rendu par des animaux, surtout des insectes, en 1961 et en 2012. Nous dépendons manifestement de plus en plus du service de pollinisation assuré par les animaux pollinisateurs.

> et autres noix dépendent à des degrés divers des pollinisateurs, et leur rôle nutritif est important, puisque, depuis cinquante ans, la production agricole de ces aliments a augmenté de 300%. Alors, si les pollinisateurs disparaissaient, nous souffririons non seulement de la faiblesse de certaines récoltes, mais aussi de la raréfaction d'aliments cruciaux pour une alimentation saine.

Par exemple ?

En France, la production de kiwis, de melons, de pastèques dépend à 95% des pollinisateurs, celle des pommes à 65%, celle des aubergines à 25% comme celles des groseilles, des figues, des fraises, des tournesols, etc. Au-delà des impacts sur la nutrition, les conséquences économiques seraient considérables : on a calculé que le service rendu en France par les pollinisateurs a une valeur comprise entre 2,3 et 5,3 milliards d'euros, soit de 5,2 à 12% de la valeur des productions végétales françaises dépendantes de la pollinisation. Au niveau mondial, la partie des récoltes qui disparaîtrait en l'absence de pollinisateurs représenterait 5 à 8% de la production, soit, d'après une estimation de 2015, une valeur monétaire comprise entre 235 et 577 milliards de dollars.

La raréfaction des pollinisateurs se fait-elle déjà sentir ?

Oui, il arrive déjà que nous manquions de pollinisateurs et que cela ait des retombées économiques négatives. Aux États-Unis, plus de la moitié des colonies d'abeilles sont mobilisées chaque année pour assurer en quelques semaines la pollinisation des vergers d'amandiers de Californie. On imagine donc facilement les difficultés, probablement insurmontables, que connaîtra cette activité agricole si les colonies d'abeilles domestiques américaines continuent de s'effondrer.

Quelles sont les principales menaces pesant sur les insectes pollinisateurs ?

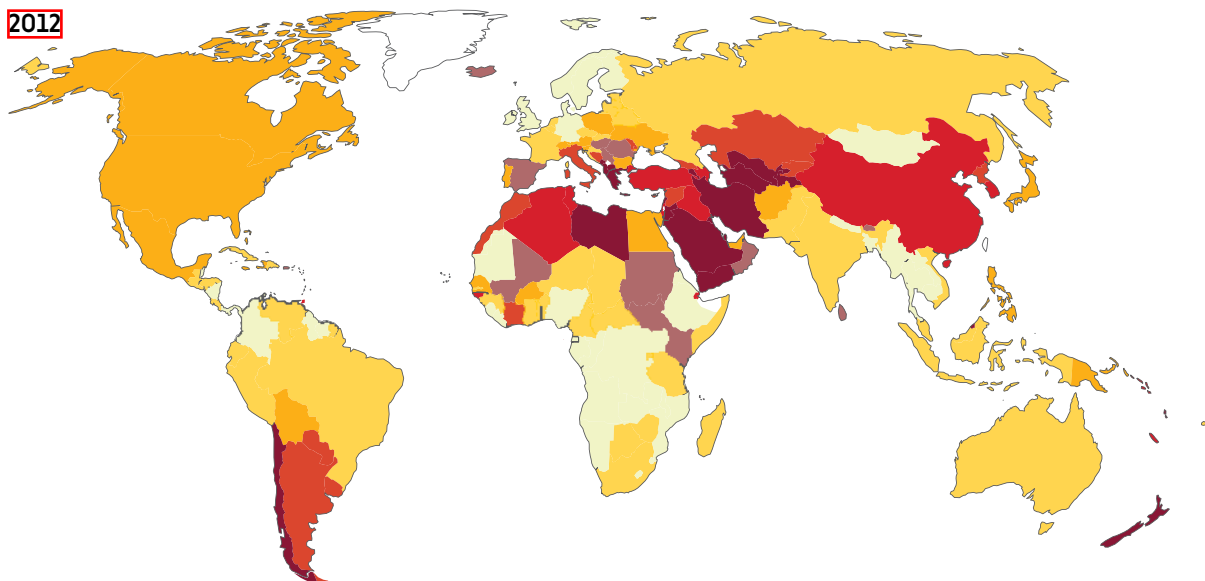
Les rapports de l'IPBES et l'ensemble des données scientifiques soulignent deux causes principales à l'origine du déclin des insectes : d'une part, la destruction massive des habitats des insectes dans le contexte de l'artificialisation générale des paysages et de l'exploitation non durable des ressources, et d'autre part les polluants. S'agissant de la première menace, elle a par exemple trait au fait que, dans le contexte d'une agriculture industrielle et productiviste, on a fortement simplifié les paysages agricoles au travers notamment de la suppression des haies et des bosquets d'arbres, diminuant ainsi les habitats des insectes. On surexploite le bois de rose à Madagascar ; on abat des forêts primaires en Indonésie pour cultiver des palmiers à huile, et aussi aux États-Unis pour en tirer du bois, qui sera brûlé en Europe pour produire de l'électricité, etc.

Et les pesticides dont on parle sans cesse ?

Ils font partie de la deuxième menace, celle des polluants chimiques, mais il pourrait bien s'agir de la première sur les pollinisateurs. À propos des pesticides, il est très significatif de s'intéresser au cas des ruches américaines. En 1945, le nombre de colonies d'abeilles aux États-Unis a atteint 6 millions, son pic historique, puis il a diminué régulièrement. Or cette année-là est aussi celle de l'introduction massive dans l'agriculture mondiale d'un célèbre insecticide organochloré : le DDT. Même s'il a été interdit dans les années 1970 dans la plupart des pays en raison de son fort impact environnemental, on en a tant dispersé que de nombreux sols de la planète en contiennent toujours des traces...

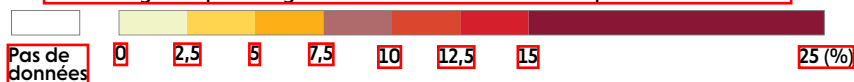
En fait, puisqu'on a inventé les pesticides et les insecticides pour tuer des arthropodes, dont des insectes, faut-il s'étonner de leurs effets ?

2012



Leur accumulation depuis les années 1950 dans l'environnement ne peut qu'avoir des effets de fond sur tous ces animaux.

Pourcentage des pertes agricoles estimées en l'absence de pollinisation animale



Étudie-t-on ces effets ?

Pas encore suffisamment, et il faudrait surtout que ces recherches s'inscrivent dans une approche où l'incidence des molécules en cause soit étudiée sur l'ensemble des composants d'un écosystème. Toutefois, il est au moins un cas emblématique dans lequel on a poussé les recherches très loin: je parle de celui des abeilles mellifères, vieilles compagnes de l'humanité, dont les mortalités de masse ont inquiété. Comme l'illustre bien le cas des amandiers de Californie, les abeilles, dont il existe environ 20 000 espèces dans la nature, sont des pollinisateurs sauvages et domestiques de première importance. On lit dans le rapport de l'IPBES que, même s'il subsiste des lacunes dans les connaissances, «les récentes recherches axées sur les insecticides à base de néonicotinoïdes témoignent d'effets létaux et sublétaux sur les abeilles, ainsi que de certaines répercussions sur leur rôle de pollinisateurs». Et une étude récente apporte la preuve d'impacts des néonicotinoïdes sur «la survie et la reproduction des pollinisateurs sauvages». Bref, il y a au moins un cas dans lequel on a étudié la situation de près, et dans ce cas, les chercheurs ont établi un lien solide entre certains pesticides et la mort en masse d'insectes pollinisateurs de première importance.

Face à cette avalanche de nouvelles inquiétantes, quels espoirs peut-on concevoir quant à l'avenir des animaux pollinisateurs ?

Nous, les chercheurs étudiant la biodiversité, avons longtemps eu l'impression de prêcher dans le désert. Mais depuis la dernière réunion

plénière de l'IPBES en 2019 et la publication de son rapport, nous avons le sentiment d'une prise de conscience de la menace qui pèse à échelle planétaire sur la biodiversité. Jamais nous n'avions été autant sollicités par les médias désireux de rendre compte du constat fait par les experts rassemblés par l'IPBES... Le rapport fait des recommandations pour les gouvernements, qui, espérons-le, vont être suivies d'effets. En principe, nous sommes sur une trajectoire d'interdiction des néonicotinoïdes en Europe, et, en France, l'objectif est de réduire drastiquement l'usage des produits phytosanitaires. La très forte réorientation vers l'agroécologie de l'Inra, un organisme de recherche qui a pu par le passé être accusé de venir en appui d'une agriculture productiviste, me semble très positive et significative de la prise de conscience actuelle.

Et puis, il ne faut pas tout attendre des gouvernements: les individus peuvent aussi agir. Les consommateurs qui, de plus en plus, préfèrent les légumes dits bio, lesquels ont en tout cas été produits en suivant un certain cahier des charges laissant plus de chances aux insectes dans les jardins, exercent aussi une énorme pression pour que les pratiques changent. S'il est un domaine où la culture du prix bas et de la faible qualité installée par les grands distributeurs a amplifié la catastrophe écologique, c'est bien celui de l'alimentation. Le fait que les chaînes de supermarché se mettent à vendre du bio est certainement un signe d'espoir pour les précieux insectes à qui nous devons nos fruits. ■

Propos recueillis par François Savatier

BIBLIOGRAPHIE

F. Sánchez-Bayo et K. A. G. Wyckhuys, **Worldwide decline of the entomofauna : A review of its drivers**, *Biological Conservation*, vol. 232, pp. 8-27, 2019.

C. A. Hallmann et al., **More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas**, *Plos One*, vol. 12, e0185809, 2017.

Rapport d'évaluation sur les pollinisateurs, la pollinisation et la production alimentaire – résumé à l'intention des décideurs, IPBES, 2016.

L'ESSENTIEL

> Tout au long de l'histoire cosmique, la Voie lactée a grandi par l'accrétion de galaxies de plus petite taille. Ces interactions ont laissé une trace dans les propriétés, les positions et les trajectoires des étoiles.

> Pour les étudier, l'Agence spatiale européenne a lancé en 2013 le satellite Gaia. L'année dernière, la mission a publié le catalogue stellaire le plus complet de l'histoire de l'astronomie.

> Les nouvelles données, en nombre et en précision sans précédent, portent sur plus de 1,3 milliard d'étoiles ainsi que sur les orbites de 14 000 astéroïdes.

> Elles ont déjà révélé certains épisodes du passé de la Voie lactée et précisé nos connaissances sur l'évolution stellaire. Elles commencent à transformer différents domaines de l'astrophysique et de la cosmologie.

La première carte

Plus de 1,3 milliard d'étoiles de notre galaxie cartographiées avec une précision inédite : ce catalogue astronomique dressé par la mission *Gaia* de l'Agence spatiale européenne est en train de transformer la vision et la compréhension que nous avons de notre environnement cosmique.

LES AUTEURS



CARME JORDI
chercheuse à l'institut des sciences du cosmos
de l'université de Barcelone et à l'institut d'études
spatiales de Catalogne, en Espagne, et membre
de l'équipe scientifique de Gaia



EDUARD MASANA
chercheur à l'institut des sciences du cosmos
et à l'Institut d'études spatiales de Catalogne,
coresponsable du groupe de travail sur
les simulations au sein de l'équipe scientifique de Gaia

3D de la Voie lactée



Le satellite *Gaia* a mesuré avec une très grande précision les parallaxes et les mouvements propres de milliards d'étoiles de la galaxie. La parallaxe d'un astre est due à son mouvement apparent sur le fond du ciel (*ellipses*) sous l'effet de la révolution de la Terre autour du Soleil. Étant donné la très faible valeur de ces parallaxes, elles ont été ici agrandies par un facteur 100 000.

Comment la Voie lactée s'est-elle formée? D'où viennent ses étoiles? Quelles sont, de façon générale, ses propriétés? C'est pour répondre à ces questions que l'ESA, l'Agence spatiale européenne, a lancé fin 2013 le satellite *Gaia*, l'une des missions astronomiques récentes les plus ambitieuses. Au bout de quatre années d'observations, le consortium *Gaia* a publié en avril 2018 un catalogue indiquant la position, la parallaxe, le mouvement, la couleur et l'éclat de plus de 1,3 milliard d'étoiles. Ce nombre gigantesque – sans équivalent dans l'histoire de l'astronomie – et l'exquise précision des mesures ont commencé à remettre en cause une bonne part de ce que nous croyions savoir sur notre galaxie, ainsi que sur les mécanismes d'évolution stellaire.

On admet généralement que la formation des galaxies suit un scénario hiérarchique: les galaxies petites fusionnent peu à peu et forment des galaxies plus grandes. Ce mécanisme d'agrégation peut s'étaler sur des millions d'années, et l'on est aujourd'hui capable de le reconstituer en étudiant les orbites et les propriétés des étoiles d'une galaxie donnée. Les étoiles provenant d'une galaxie naine engloutie par le passé présentent en effet des trajectoires et des caractéristiques qui les distinguent des autres et permettent de remonter jusqu'à leur origine. Ainsi, le meilleur moyen de reconstituer le passé de la Voie lactée consiste à cartographier avec le maximum de précision le mouvement, la distance, l'âge et la composition chimique d'autant d'étoiles que possible. Tel est bien l'objectif de la mission *Gaia*.

L'analyse de ces données a déjà produit son lot de surprises. Nous avons par exemple appris qu'il y a 10 milliards d'années, la Voie lactée est entrée en collision et a fusionné avec une autre galaxie environ quatre fois plus petite qu'elle. De même, il semble qu'à une époque bien plus récente, le passage rapproché d'une autre galaxie naine a déclenché une série de perturbations des orbites des étoiles du disque de la Voie lactée, perturbations observées encore aujourd'hui.

L'énorme quantité des nouvelles données et leur précision permettent d'analyser les mécanismes d'évolution stellaire comme jamais auparavant. Ces travaux ont déjà révélé l'existence de populations d'étoiles inattendues et offert des preuves observationnelles de phénomènes jusque-là hypothétiques. Au-delà du voisinage galactique immédiat, les mesures de *Gaia* révèlent la dynamique du halo sphérique et diffus d'étoiles qui entoure le disque galactique, ainsi que celle des galaxies naines satellites qui gravitent autour de son centre. Cette vague de découvertes ne fait que commencer.

Le satellite *Gaia* a été lancé en décembre 2013 et a été placé au point de Lagrange L2 du



LA VOIE LACTÉE EN QUELQUES CHIFFRES

Notre galaxie présente un disque épais d'environ 1 000 années-lumière en moyenne et de diamètre compris entre 100 000 et 200 000 années-lumière. On estime qu'elle contient 100 à 400 milliards d'étoiles, dont beaucoup auraient des planètes. Sa masse est estimée entre $1,1 \times 10^{12}$ et $2,3 \times 10^{12}$ masses solaires, soit plus de 10 fois celle des étoiles. Le Soleil se trouve à environ 26 500 années-lumière du centre galactique, autour duquel il effectue une révolution en quelque 250 millions d'années, à la vitesse de 230 kilomètres par seconde.

système Terre-Soleil (à 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil) où il se maintiendra jusqu'à la fin de sa mission. Ses observations ont débuté en juillet 2014. Le satellite tourne en 6 heures sur son axe, lequel suit lui-même un mouvement de précession autour de la direction Terre-Soleil avec une période de 63 jours. Ces deux mouvements, alliés à son déplacement autour du Soleil en même temps que la Terre (en un an, donc), permettent à ses capteurs de couvrir l'ensemble du ciel en 6 mois environ.

70 MILLIONS D'ÉTOILES INSPECTÉES PAR JOUR

Grâce à ce balayage de la voûte céleste, *Gaia* inspecte en moyenne 70 millions d'étoiles par jour. Chacune de ces observations donne lieu à 9 mesures de la position et de l'éclat, à l'obtention de deux spectres de basse résolution dans les parties bleues et rouges du spectre visible ainsi qu'à trois autres spectres de plus haute résolution dans l'infrarouge. On déduit des premiers spectres la nature de l'astre observé et certaines de ses propriétés telles que sa température et sa gravité de surface. Les seconds servent à déterminer la vitesse radiale de l'étoile (c'est-à-dire sa vitesse le long de la ligne de visée) ainsi que sa composition chimique. *Gaia* est équipé d'un ensemble de 106 dispositifs à transfert de charge (des CCD) qui équivalent à une caméra de 1 gigapixel, la caméra la plus performante jamais lancée dans l'espace. Le



Octobre 2013 : les ingénieurs de l'Agence spatiale européenne se préparent à inspecter le satellite *Gaia* sur la base de Kourou, en Guyane française. Le satellite, d'une masse totale de près de 2 tonnes, a été lancé en décembre de la même année.

14 avril 2018, deux semaines avant la publication de son dernier catalogue en date, *Gaia* a franchi la barre des 100 milliards d'observations.

Le traitement de cette masse d'informations permet d'extraire les caractéristiques de chaque étoile : sa position et son mouvement, à chaque fois en trois dimensions (c'est-à-dire sur la voûte céleste et en profondeur, le long de la ligne de visée), et ses propriétés physiques et chimiques. Le consortium pour l'analyse des données (DPAC, d'après le sigle anglais) est réparti sur 6 centres de calcul et regroupe 450 personnes, chercheurs et ingénieurs, dans différents pays d'Europe.

Pour bien comprendre l'importance de *Gaia*, il faut rappeler que lorsqu'on observe un objet astronomique, on ne sait pas *a priori* s'il est proche et peu lumineux ou lointain et très brillant. Certaines étoiles variables, telles les céphéides ou les RR Lyrae, pulsent d'autant plus rapidement qu'elles sont massives et lumineuses. De telles étoiles étant repérées dans une galaxie lointaine, la mesure de leur période de pulsation indique alors leur luminosité absolue ce qui, étant donné leur éclat apparent, détermine leur distance. L'accumulation de ces mesures de distances de galaxies lointaines et la mesure de leurs vitesses de fuite par effet Doppler (mesure relativement aisée) précise ensuite la relation dite de Hubble, qui donne la vitesse à laquelle l'expansion cosmique emporte une galaxie en fonction de son éloignement. Ce qui permet d'établir les distances d'objets bien trop éloignés pour qu'on y distingue la moindre étoile variable.

Mais pour que tout cela fonctionne, encore faut-il avoir calibré la relation période-luminosité d'un grand nombre de céphéides ou de RR Lyrae assez proches pour que l'on puisse établir leur distance par une mesure directe indépendante. Toutes les distances stellaires, les distances galactiques ainsi que la taille estimée de l'Univers visible reposaient donc jusqu'ici sur le catalogue de 120 000 étoiles proches dressé au début des années 1990 par le précurseur de *Gaia*, le satellite *Hipparcos*. *Gaia* a élevé ce nombre à plus de 1 milliard et amélioré de façon spectaculaire la précision des données. C'est d'autant plus important qu'il semble maintenant exister plusieurs populations aux propriétés légèrement différentes au sein des étoiles variables, ce qui pourrait modifier un peu les « chaînes d'arpenteur » utilisées par les astronomes et les cosmologistes.

Les mesures de distances directes, c'est-à-dire les mesures des parallaxes stellaires, sont donc un des résultats clés de *Gaia*. La parallaxe d'une étoile est l'angle qui sous-tend le couple Soleil-Terre tel qu'il est vu depuis l'étoile. On peut la mesurer en notant la position apparente de l'étoile sur la voûte céleste lorsque la Terre se trouve en deux points opposés de son orbite

autour du Soleil, et elle est directement reliée à la distance de l'étoile : plus l'étoile est lointaine, plus la parallaxe est petite. La précision de la mesure de la parallaxe en fin de mission de *Gaia* sera de moins de 0,01 milliseconde d'arc pour les étoiles les plus lumineuses (l'équivalent du diamètre apparent d'une pièce de 1 euro posée sur la Lune, vue de la Terre), et quelque 0,6 milliseconde d'arc pour les astres les moins brillants. À titre de comparaison, la précision des parallaxes du catalogue de *Hipparcos* n'atteignait que 1 milliseconde d'arc.

Jusqu'à présent, le consortium a publié deux catalogues. Le premier, en septembre 2016, incluait la position et l'éclat de 1 milliard d'étoiles ainsi que la distance et le mouvement sur la voûte céleste de près de 2 millions d'étoiles brillantes. Le second, publié en 2018, a porté cette quantité à 1,33 milliard. De surcroît, il fournit la couleur de 1,4 milliard d'étoiles, les paramètres physiques de centaines de millions d'entre elles et la vitesse radiale de 7 millions. À tout cela s'ajoute un demi-million de courbes de luminosité (la mesure de l'éclat en fonction du temps) correspondant à autant d'étoiles variables ainsi que des informations sur les orbites de 14 000 astéroïdes présélectionnés. Cette masse d'informations dépasse de plusieurs ordres de grandeur tous les catalogues astrométriques précédents.

UNE FENÊTRE SUR LE PASSÉ DE NOTRE GALAXIE

L'image que nous nous faisons de la Voie lactée est celle d'une galaxie spirale constituée d'un disque d'étoiles en rotation enchâssé dans un halo diffus d'étoiles plus anciennes. Ce halo a une forme à peu près sphérique autour du bulbe galactique, l'agglomération dense d'étoiles qui occupe la partie centrale de la Voie lactée. En ce qui concerne sa formation, on a découvert au cours des dernières années divers indices suggérant que la galaxie a subi plusieurs interactions avec des galaxies plus petites, interactions qui ont modifié sa structure.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les interactions des galaxies laissent des traces dans les orbites de leurs étoiles. D'un autre côté, on est en droit de penser que si deux groupes d'étoiles ont des origines différentes, ils se distingueront aussi par leur composition chimique. Ce type d'analyse chimicodynamique a été mené l'année dernière sous la direction d'Amina Helmi, de l'université de Groningen. Grâce au second catalogue *Gaia*, l'équipe a identifié un groupe d'étoiles proches du Soleil, mais dont la composition chimique est différente et qui tournent autour du centre galactique en sens inverse de notre étoile.

Ces différences s'expliquent s'il s'agit d'étoiles provenant d'une autre galaxie qui aurait été avalée par la Voie lactée dans le passé. ➤

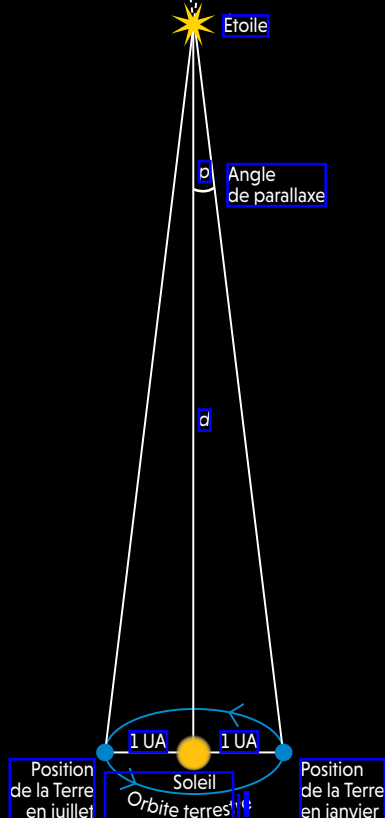
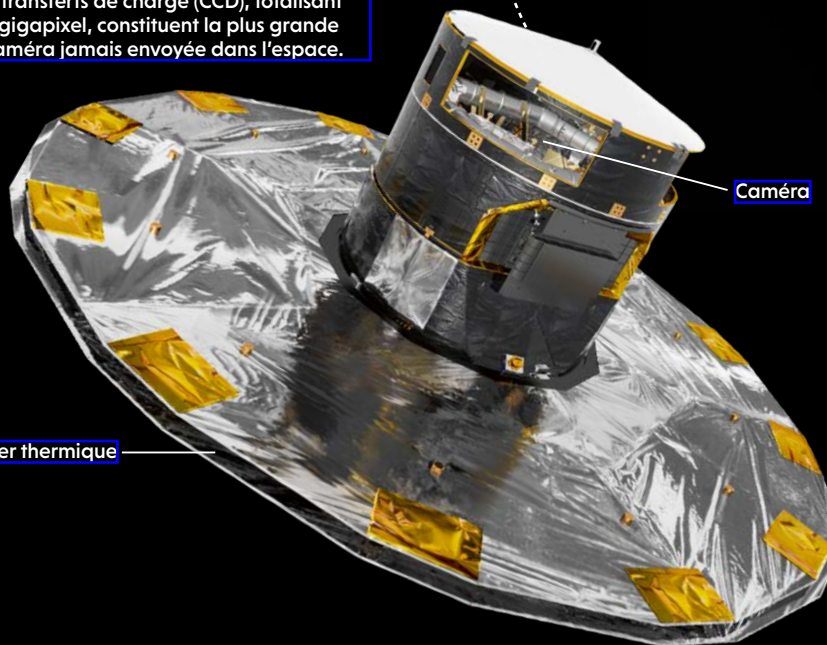
UNE CARTE STELLAIRE D'UNE PRÉCISION INÉGALÉE

Le satellite Gaia a été conçu par l'ESA pour mesurer la position, le mouvement et les propriétés physiques et chimiques des étoiles de la Voie lactée. À l'aide de ces données, les astronomes commencent à reconstituer le passé de la Voie lactée et à mieux comprendre les mécanismes de l'évolution stellaire. En avril 2018, le consortium Gaia a rendu public un catalogue contenant les caractéristiques de plus de 1,3 milliard d'étoiles, masse de données qui occupera les astronomes pendant des années.



LE SATELLITE

D'une masse de près de 2 tonnes pour un diamètre de 11 mètres et une hauteur de 2,3 mètres, le satellite Gaia (ci-dessous) se trouve au point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil, soit à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil. Il inspecte 70 millions d'étoiles par jour et effectue un balayage complet de la voûte céleste tous les six mois. Ses 106 dispositifs à transferts de charge (CCD), totalisant 1 gigapixel, constituent la plus grande caméra jamais envoyée dans l'espace.

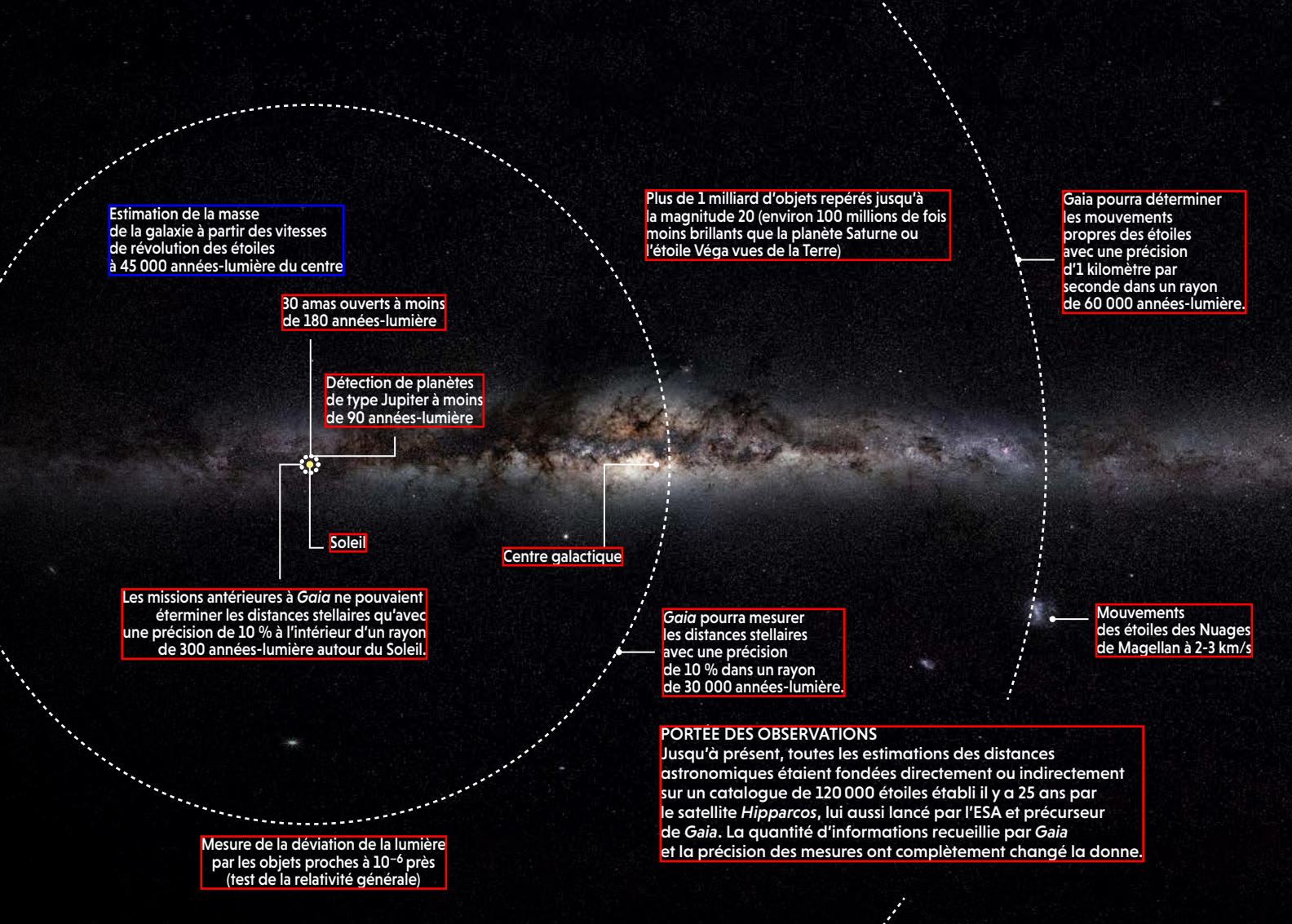


Bouclier thermique

PARALLAXES, DISTANCES ET VITESSES

Gaia mesure l'angle sous lequel est vu le couple Terre-Soleil depuis une étoile donnée (à gauche). Un calcul élémentaire de trigonométrie permet de trouver la distance à l'étoile à partir de cet angle. Par rapport aux missions précédentes, Gaia a multiplié par plusieurs dizaines la précision des mesures de ce paramètre. Dans le même temps, le fait de pouvoir observer une même étoile pendant de longues périodes de temps permet de mesurer son mouvement propre dans le plan de la voûte céleste. Quant à sa vitesse radiale (le long de la ligne de visée), elle est donnée par l'analyse du spectre électromagnétique de l'étoile, grâce à l'effet Doppler.

d = distance à l'étoile
UA = unité astronomique
(la distance Soleil-Terre soit environ 150 millions de kilomètres)



Les données de *Gaia* sont assez précises pour que les modèles théoriques d'interactions entre galaxies remontent jusqu'aux caractéristiques de la galaxie incidente et même à la date où l'événement s'est produit. Amina Helmi et ses collègues estiment ainsi qu'il y a environ 10 milliards d'années (lorsque l'Univers avait le quart de son âge actuel), la Voie lactée est entrée en collision avec une galaxie à peu près quatre fois moins massive qu'elle. Les chercheurs ont nommé Gaia-Enceladus cette galaxie disparue.

UNE GALAXIE NAIN AURAIT TRAVERSÉ LA VOIE LACTÉE

La fusion de la Voie lactée avec Gaia-Enceladus semble avoir été l'un des événements les plus importants de l'histoire de notre galaxie. Mais cet événement, évidemment, n'est pas unique. Considérons ce qui se serait passé si une galaxie naine avait carrément traversé le disque de la Voie lactée. Un tel événement produirait une perturbation locale, les étoiles se trouvant entraînées dans le sillage de la galaxie naine sans toutefois être complètement expulsées du disque, retenues qu'elles sont par sa gravité. Les étoiles perturbées acquerraient ainsi un mouvement d'oscillation autour du plan galactique en

même temps qu'elles continueraient leur orbite autour du centre de la Voie lactée, tels les chevaux de bois d'un manège. Existe-t-il aujourd'hui des indices d'un tel événement?

Si l'on s'en réfère aux données de *Gaia*, la réponse est oui. C'est ce qu'a montré une étude dirigée par Teresa Antoja, de l'institut des sciences du cosmos de Barcelone, et publiée en 2018. Les chercheurs ont analysé les positions et les vitesses de près de 1 million d'étoiles du voisinage solaire et en particulier la relation entre leur vitesse dans la direction perpendiculaire au plan galactique et leur distance à ce plan. La comparaison de ces données avec des simulations montre qu'elles sont compatibles avec la survenue, il y a environ 500 millions d'années, d'un événement comme celui que nous venons de décrire. Cette date coïncide avec le dernier passage de la galaxie du Sagittaire (une des galaxies naines proches de la Voie lactée) au point de son orbite le plus proche du centre galactique. Les données de *Gaia* démontrent ainsi que la dynamique du disque galactique est beaucoup plus complexe qu'on ne l'imaginait et qu'il faut réviser nos modèles actuels.

L'étude des amas stellaires, ces groupes d'étoiles qui se sont formées à partir d'un

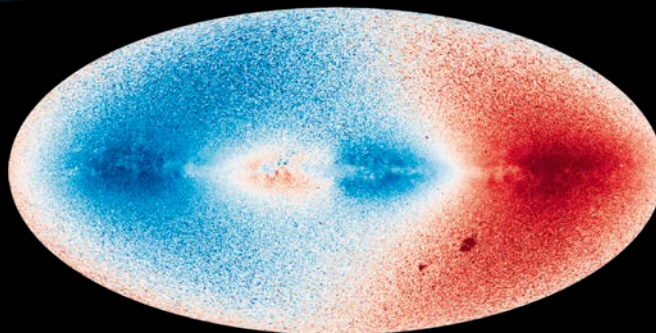
LE PASSÉ ET LE PRÉSENT DE LA VOIE LACTÉE

Par le passé, la Voie lactée s'est agrandie en fusionnant successivement avec des galaxies plus petites. Les vestiges de ces interactions subsistent aujourd'hui dans les propriétés des étoiles, puisque les astres provenant d'une galaxie naine engloutie autrefois par la Voie lactée présentent encore aujourd'hui des mouvements et des caractéristiques communes. Grâce aux cartes des positions et des vitesses élaborées par Gaia (ci-dessous), les astronomes commencent à reconstituer certains détails de l'histoire de notre galaxie (page ci-contre).



LES POSITIONS ET LES ÉCLATS DES ÉTOILES
Carte du ciel obtenue à partir des données du second catalogue Gaia. En plus des étoiles de la Voie lactée, on observe les deux Nuages de Magellan (en bas à droite), deux galaxies satellites de la nôtre.

CARTE DES VITESSES
Cette carte du ciel montre la vitesse de chaque étoile le long de la ligne de visée : dans les tons rouges, celles qui s'éloignent du Soleil, et en bleu, celles qui s'en rapprochent. Cette information, alliée aux données sur le mouvement propre sur le fond du ciel et à la parallaxe, permet de reconstituer le mouvement de révolution de ces étoiles autour du centre galactique.



► même nuage de gaz et de poussière, bénéficient également des données de Gaia. Du fait de leur origine commune, les étoiles d'un amas ont le même âge et la même composition chimique initiale, ainsi qu'un même mouvement d'ensemble dans l'espace, vestige de celui du nuage originel. Malheureusement, lorsque nous observons le ciel, les étoiles d'un même amas nous apparaissent, sur le fond de la voûte céleste, superposées à d'autres étoiles qui se trouvent à l'avant-plan ou à l'arrière-plan de l'amas. Seule la coïncidence des mouvements et des parallaxes permet de distinguer les étoiles qui appartiennent à l'amas des autres.

Plusieurs équipes ont exploité cette idée pour découvrir des groupes d'étoiles ayant des comportements communs. Grâce à la précision des données de Gaia, on a découvert des dizaines d'amas stellaires inconnus jusque-là. De surcroît, l'analyse des amas déjà connus (environ 3000) a révélé que beaucoup d'entre eux sont en réalité bien plus étendus qu'on ne le croyait et que, par ailleurs, certains n'étaient pas de véritables amas, mais de simples astérismes (des étoiles qui semblent regroupées sur la voûte céleste, mais qui n'ont en fait aucun

lien physique entre elles). Tel était le cas par exemple des « amas » les plus âgés de la partie interne du disque galactique. D'après les modèles théoriques, de tels amas auraient dû se désagréger rapidement sous l'effet de leurs nombreuses interactions avec les autres étoiles du disque et auraient dû s'y dissoudre depuis longtemps. Ces vieux amas jetaient donc un doute sur la validité des modèles. Or Gaia a permis de montrer qu'en fait, ces « amas » inexplicables n'existent pas.

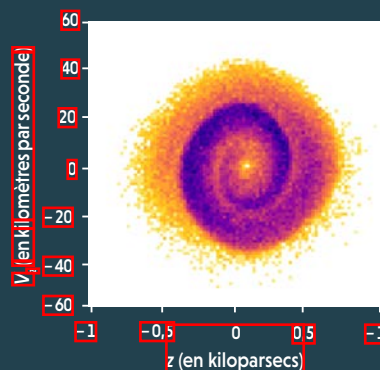
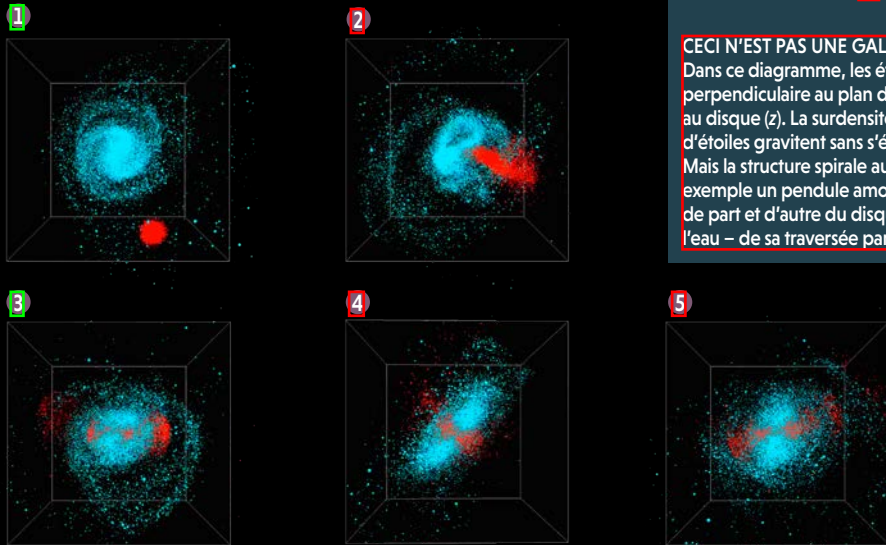
DES APPORTS À LA PHYSIQUE DES ÉTOILES

Les résultats de Gaia vont plus loin que la reconstitution du passé de la Voie lactée. En particulier, l'abondance des mesures commence à remplir des trous qui subsistaient dans notre compréhension de la structure et de l'évolution des étoiles.

L'un des principaux outils de la physique stellaire est le diagramme de Hertzsprung-Russell (H-R). Il a été conçu il y a plus d'un siècle par l'astronome danois Ejnar Hertzsprung et de façon indépendante par l'Américain Henry Norris Russell qui eut, comme lui, l'idée

CANNIBALISME GALACTIQUE

Les simulations informatiques reconstituent les mouvements que devraient adopter au cours du temps (1 à 5) les étoiles de deux galaxies (en rouge et en bleu) qui entrent en collision. Lorsqu'on les compare aux données observationnelles de *Gaia*, ces simulations nous font remonter dans le passé de la Voie lactée. Par exemple, ce type d'analyse a révélé récemment qu'il y a 10 milliards d'années la Voie lactée a englouti une galaxie quatre fois plus petite qu'elle, nommée depuis Gaia-Enceladus.



CECI N'EST PAS UNE GALAXIE...

Dans ce diagramme, les étoiles (en couleurs) sont repérées par leur vitesse perpendiculaire au plan du disque galactique (V_z) et leur distance au disque (z). La surdensité visible au centre indique qu'un grand nombre d'étoiles gravitent sans s'éloigner du disque et en restant dans son plan. Mais la structure spirale autour est typique de ce que montrerait par exemple un pendule amorti. Elle suggère que nombre d'étoiles oscillent de part et d'autre du disque galactique, vestige – tels des ronds dans l'eau – de sa traversée par une galaxie naine il y a 500 millions d'années.

d'y placer les étoiles observées en fonction de leur température (en abscisse) et de leur luminosité (en ordonnée), deux grandeurs qui évoluent de la naissance à la mort de l'étoile.

UN DIAGRAMME H-R PORTANT SUR 4 MILLIONS D'ÉTOILES

Lorsque nous observons une étoile et que nous mesurons ses propriétés, sa position dans le diagramme H-R dépend essentiellement de son âge d'une part et de sa masse et de sa composition chimique d'autre part. Cependant, nous ne disposons jusqu'ici que de données partielles sur certaines étapes de la vie stellaire correspondant à leur passage dans des régions particulières du diagramme H-R. *Gaia* a changé la donne. Puisque le satellite mesure les distances stellaires, la luminosité apparente d'un astre (sa luminosité vue de la Terre) donne accès à sa luminosité absolue (sa luminosité intrinsèque). En conséquence, nous pouvons placer les étoiles sur le diagramme avec une telle précision que nous commençons à y voir des détails impossibles à apprécier auparavant.

Sur la base des données de *Gaia*, on a réalisé un diagramme H-R contenant plus de 4 millions

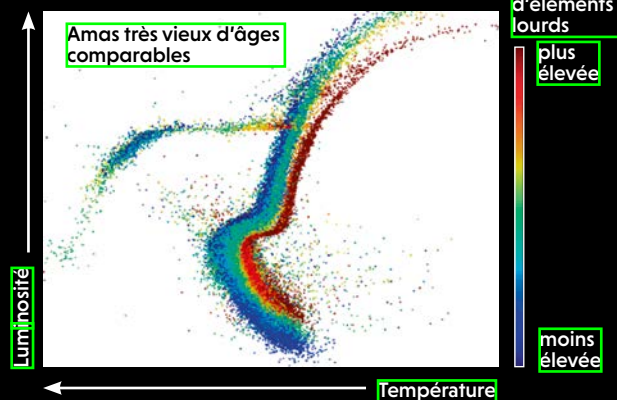
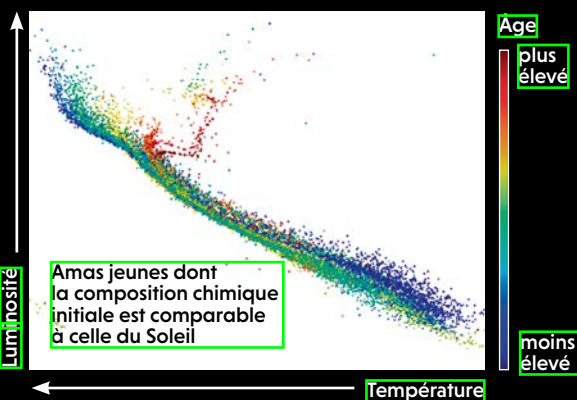
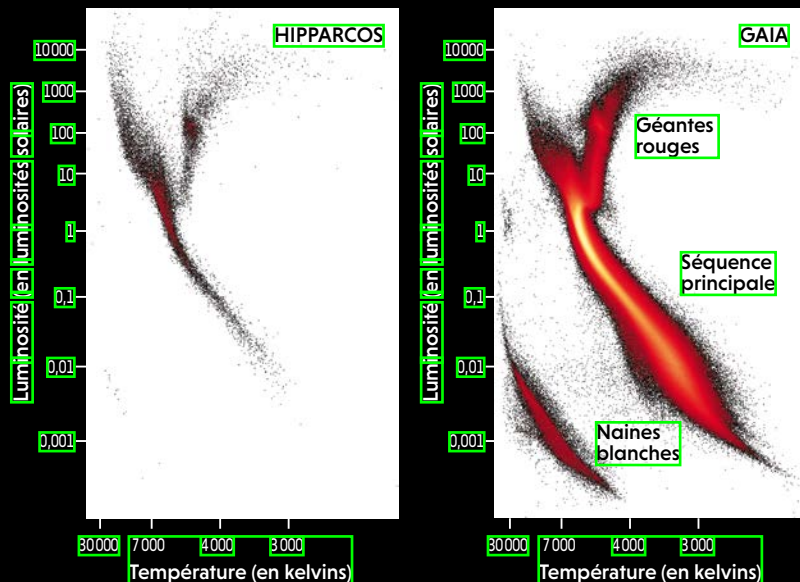
d'étoiles, celles pour lesquelles les données étaient les plus précises. À titre de comparaison, celui réalisé à l'époque de *Hipparcos* n'incluait les propriétés que de 20 000 étoiles. Ces nouvelles données font ressortir très clairement plusieurs populations d'étoiles, en particulier celles de la séquence principale (les étoiles qui, comme le Soleil, en sont encore à fusionner l'hydrogène de leur cœur), les géantes (qui fusionnent l'hydrogène dans leur enveloppe ou ont déjà atteint l'étape de la fusion de l'hélium) et les naines blanches (des résidus stellaires compacts qui subsistent après qu'une étoile comme le Soleil a épuisé son combustible nucléaire). Les naines blanches sont très nombreuses, mais difficiles à observer parce qu'elles émettent très peu de lumière. Leur distribution en luminosité (combien on observe de naines blanches pour chaque luminosité) et leur distribution en masse (combien il y a de naines en fonction de la masse) nous renseignent sur l'histoire de la production stellaire dans la galaxie. Les données de *Gaia* contiennent un échantillon de plus de 15 000 naines blanches du voisinage solaire, contre à peine 250 auparavant. Les détails du nouveau diagramme H-R

UN NOUVEAU REGARD SUR LA VIE DES ÉTOILES

La mission Gaia commence également à transformer notre compréhension de l'évolution des étoiles. Un des principaux outils de la physique stellaire est le diagramme de Hertzsprung-Russell (H-R) : la relation observée entre la température d'une étoile et sa luminosité. Les astronomes testent leurs modèles d'évolution

stellaire sur la base de ce diagramme. L'énorme quantité d'étoiles étudiées par Gaia a permis de reconstituer le diagramme H-R avec un niveau de détail inédit (ci-dessous). Il en ressort l'existence de populations d'étoiles passées jusqu'ici inaperçues et la possibilité d'étudier séparément un grand nombre d'amas stellaires connus (en bas).

LE PLUS GRAND RECENSEMENT DE L'HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE
Gaia a constitué un diagramme de Hertzsprung-Russell à partir des données observationnelles de 4 276 690 étoiles (à droite); le précédent comprenait 20 000 étoiles du catalogue Hipparcos (à gauche). Les étoiles de la séquence principale (qui brûlent de l'hydrogène dans leur cœur) s'alignent le long d'une diagonale qui signifie simplement que les plus chaudes sont aussi les plus brillantes (ce sont aussi les plus massives et celles qui consomment leur hydrogène le plus vite). Celles qui passent ensuite à un nouvel équilibre fondé sur la fusion de l'hydrogène dans leur enveloppe gonflent et deviennent plus froides en surface, puis fusionnent l'hélium : elles sont à la fois très lumineuses (à cause de leur surface émettrice plus étendue) et plus rouges, c'est la population des géantes. Lorsque le combustible nucléaire s'épuise, elles s'effondrent en scories très chaudes, mais peu lumineuses au vu de leur très petite taille : les naines blanches. Le diagramme Gaia a révélé une diversité insoupçonnée dans le groupe des naines blanches, notamment le phénomène encore jamais observé de cristallisation.



AMAS D'ÉTOILES

Les étoiles d'un amas ont toutes le même âge et la même composition chimique initiale. On compare (à gauche) des « amas ouverts » de compositions chimiques semblables et on constate que leurs séquences principales sont presque superposables. Principale différence : dans les amas les plus anciens (en rouge), les étoiles les plus massives ont déjà eu le temps de consommer leur hydrogène et sont en train de s'échapper vers la zone des géantes rouges du diagramme H-R. On observe le même coude avec les « amas globulaires » qui sont beaucoup plus âgés (à droite). Mais cette fois, les populations ne se superposent pas. Leur position dépend de leur contenu en éléments lourds.

➤ dans cette région mettent en lumière plusieurs structures distinctes, différenciant les naines blanches selon leur atmosphère (notamment entre celles constituées surtout d'hydrogène et celles dominées par l'hélium), leur masse ou leur statut d'étoile double.

Les données de *Gaia* soutiennent l'idée de nombreuses fusions et accrétions de galaxies

Par ailleurs, l'astrophysicien Hugh Van Horn avait postulé en 1968 qu'en se refroidissant, l'intérieur d'une naine blanche pourrait passer à l'état solide en se cristallisant progressivement, cette transition de phase libérant une chaleur latente qui modifierait le rythme de refroidissement de l'astre. Or l'une des structures du diagramme H-R dans le groupe des naines blanches est la signature, observée pour la première fois, de ce phénomène prévu il y a cinquante ans.

Nous avons déjà mentionné que les étoiles d'un amas, qui partagent une même origine, ont le même âge et la même composition chimique initiale. Mais chacune de ces étoiles évolue selon un rythme imposé par sa masse. En reportant sur un diagramme H-R les luminosités et les températures de toutes les étoiles appartenant à un même amas, on obtient une « isochrone » : un instantané des propriétés d'un ensemble d'étoiles de même âge. En comparant les isochrones d'amas d'âges différents, il devient ainsi possible de comparer les observations avec les modèles d'évolution stellaire. C'est la première fois que l'on dispose d'isochrones empiriques et précises pour une multitude d'amas. Cela suscitera sans aucun doute de précieuses améliorations de nos modèles de structure et d'évolution stellaires.

Les données de *Gaia* sont également précieuses pour étudier le halo extérieur et le voisinage de la galaxie. Grâce à l'analyse des étoiles contenues dans à peu près la moitié des amas globulaires (des pelotes compactes d'étoiles qui gravitent autour du centre galactique), dans les quelques galaxies sphéroïdales voisines et dans les deux Nuages de Magellan (deux galaxies satellites de la Voie lactée), on connaît désormais leurs

mouvements avec beaucoup plus de précision, même s'il subsiste des biais systématiques dans les données.

L'analyse des surdensités d'étoiles au sein du halo externe révèle pour la première fois une carte cinématique et structurelle des courants stellaires de la Voie lactée. Il existe en effet un réseau complexe de tels courants qui s'entrecroisent et qui présentent bien souvent une cohérence cinématique surprenante. Plusieurs de ces structures étaient inconnues jusqu'ici. Cette nouvelle carte accrédite bien le scénario selon lequel la Voie lactée a subi un nombre considérable de fusions et d'accrétions de galaxies mineures au cours de son histoire.

Les galaxies naines sphéroïdales voisines ne se trouvent pas toutes dans le même plan, même si toutes ont des orbites très inclinées par rapport au disque galactique. On a observé des asymétries et, peut-être, des traces d'un effet de marée chez certaines de ces galaxies. L'analyse du mouvement de ces galaxies satellites permet aussi d'estimer la masse de la Voie lactée.

UNE MISSION PROLONGÉE

Que nous réserve le futur ? Il était prévu que la mission dure jusqu'en juillet 2019 avec une extension possible d'un an. Mais la mission s'est révélée moins gourmande en carburant que prévu et la mise en orbite a été très efficace. On prévoit aujourd'hui que le carburant s'épuisera vers 2024 ; c'est pourquoi l'ESA a déjà décidé d'étendre la mission à la fin 2020, et elle étudie la possibilité de la faire durer encore deux années supplémentaires. Plus on observe une étoile longtemps, meilleure est la détermination de son mouvement. Il devient également possible de mesurer toute déviation de ce mouvement par rapport à la ligne droite. Si tel est le cas, cela indique que l'étoile possède un compagnon – une autre étoile ou une planète. On estime que *Gaia* pourrait détecter ainsi près de 20 000 planètes comparables à Jupiter et 6 000 autres par la méthode du transit (la brève baisse de luminosité d'une étoile lorsqu'une planète vient à passer devant elle).

Pendant que la communauté scientifique dépouille les données de son second catalogue, le satellite *Gaia* poursuit ses observations quotidiennes. La prochaine livraison de données est prévue pour 2020. Ce troisième catalogue précisera les données existantes et inclura une nouvelle information : la classification de certains objets observés en étoiles, galaxies ou quasars, les température, gravité de surface, composition chimique et autres propriétés de multiples étoiles, ainsi que les orbites précises de certains corps du Système solaire. La communauté astronomique peut se réjouir, les données déjà fournies par *Gaia* et celles qui restent à venir lui donneront du travail pour des décennies. ■

BIBLIOGRAPHIE

P.-E. Tremblay et al., **Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of evolving white dwarfs**, *Nature*, vol. 565, pp. 202-205, 2019.

A. Helmi et al., **The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk**, *Nature*, vol. 563, pp. 85-88, 2018.

T. Antoja et al., **A dynamically young and perturbed Milky Way disk**, *Nature*, vol. 561, pp. 360-362, 2018.

Archives de la mission *Gaia* : <http://gea.esac.esa.int/archive/>



Septembre 2018 :
les incendies de forêt
font rage près de Delta,
en Californie, entretenus
par une vague de chaleur
et la sécheresse.

L'ESSENTIEL

> Quand le jet-stream perd sa forme rectiligne et se met à onduler, il peut provoquer pluies torrentielles et canicules. Si jamais il se fige dans cette configuration, le mauvais temps s'installe durablement.

> Les mathématiques issues de la mécanique quantique expliquent comment des

résonances dans l'atmosphère amplifient les ondulations et aggravent encore la météo.

> Avec le réchauffement climatique, on prévoit que ce phénomène d'amplification s'aggravera à partir des années 2050.

L'AUTEUR



MICHAEL E. MANN
professeur de physique
de l'atmosphère et directeur
de l'Earth System Science
Center à l'université d'État de
Pennsylvanie, aux États-Unis

Le jet-stream, amplificateur météorologique

Le jet-stream, ce courant de vents violents qui circulent à haute altitude, est parfois responsable dans nos latitudes d'événements météorologiques extrêmes. Il est à craindre que le réchauffement climatique renforce cette tendance vers 2050. Avec à la clé vagues de chaleur et inondations à répétition.

Ces quinze dernières années, une longue litanie d'événements climatiques extrêmes a frappé le monde en été. En 2003, l'Europe a connu une vague de chaleur inédite, qui a fait 30 000 victimes. En 2010, des feux de forêt en Russie et des inondations au Pakistan ont causé des dégâts et un nombre de morts sans précédent. Un an plus tard, sous l'effet de la chaleur et la sécheresse sévissant aux États-Unis, les ranchers de l'État d'Oklahoma perdaient la moitié de leur bétail. Les feux de forêt de 2016 en Alberta ont constitué la catastrophe la plus coûteuse de l'histoire du Canada. Et l'été 2018 a été tristement célèbre pour les États-Unis : des températures dépassant 37 °C ont été durablement atteintes dans le sud-ouest, des pluies abondantes et des crues ont inondé le coin nord-est du pays et la Californie a subi de terribles incendies. Le même été, des calamités météorologiques du même type ravageaient l'Europe et l'Asie.

Est-ce une coïncidence que ces catastrophes historiques surviennent de nos jours, alors que la Terre se réchauffe ? Mes collègues et moi pensons que non. Tous ces événements ont un point commun : ils se sont déroulés pendant que le jet-stream présentait une forme inhabituelle.

Le jet-stream (on dit aussi courant-jet) est un courant de vents violents qui soufflent d'ouest en est et font le tour de l'hémisphère Nord à une latitude moyenne d'environ 60°, celle du sud de la Scandinavie par exemple. Le jet-stream chemine parfois en ligne à peu près droite, mais il peut aussi onduler – il forme alors un S couché si on le dessine sur un planisphère. Par exemple, il peut traverser l'Amérique du Nord en remontant depuis l'océan Pacifique jusqu'à l'ouest du Canada, avant de bifurquer vers le sud en traversant le Midwest américain, puis de reprendre plein nord vers la Nouvelle-Écosse. Cette traversée, qui dure généralement quelques jours, apporte de l'air chaud au nord et de l'air frais au sud et déverse sur les territoires de la pluie ou de la neige, en particulier au niveau des coudes du S. Finalement, le jet-stream contrôle la météorologie quotidienne des latitudes moyennes.

Durant les événements extrêmes mentionnés, le jet-stream s'est étrangement comporté. Ses coudes se sont aventurés loin au nord et au sud, et ils ont comme calé – ils ont stoppé leur progression vers l'est. Or plus ces sinuosités sont larges, plus les conditions climatiques s'aggravent sous les pics et les creux du S couché. Et si en plus elles se figent, comme cela a été le cas durant l'été 2018, les bulletins météo se mettent à se ressembler de jour en jour, n'annonçant que pluies diluviennes ou canicules. Inondations record, sécheresses, vagues de chaleur et feux de forêt surviennent alors.



En 2010, de graves inondations ont submergé la ville de Khairpur Nathan Shah, au Pakistan. Elles puisaient leur source dans un effet atmosphérique nommé amplification quasi résonante.

Mes collègues et moi avons montré récemment que ces situations, où le jet-stream ondule et est comme paralysé, deviendront de plus en plus fréquentes en raison du réchauffement climatique, ce qui perturbera de façon répétée la météo de l'hémisphère Nord. Mais nous avons aussi prévu que, paradoxalement, la sévérité des cataclysmes pourrait marquer le pas pendant les prochaines décennies. Cela pourrait sonner comme une bonne nouvelle – la malédiction continuera sans empirer. Sauf que, selon nos analyses, les événements extrêmes s'aggraveront à partir de 2050, en particulier l'été. La santé et la sécurité des gens seront davantage menacées, les dégâts causés par les orages seront de plus en plus coûteux et les cultures, ruinées par les intempéries, risqueront de ne plus suffire à nourrir une population mondiale toujours croissante.

D'où tirons-nous ces prévisions ? De la théorie des ondes et de la mécanique quantique. Oui, les mathématiques qui décrivent le comportement des électrons à petite échelle nous aident à dessiner le futur de l'atmosphère aux échelles globales. Elles indiquent que la multiplication des événements extrêmes, le plateau à venir et la nouvelle intensification qui s'ensuivra sont pilotés par un étrange compromis entre les



concentrations de gaz à effet de serre provenant de combustibles fossiles brûlés et la pollution par le soufre provenant des cheminées industrielles. Elles soulèvent aussi la question de savoir si la réduction des émissions empêchera bien le jet-stream de causer des ravages, ce qui est loin d'être une certitude...

LES ONDES DE ROSSBY, À L'ORIGINE DU MAUVAIS TEMPS

Quelle est l'origine du jet-stream? Ces vents se forment quand l'air chaud de surface des régions subtropicales remonte vers le nord et rencontre l'air froid de surface en provenance des pôles, ce qui se produit approximativement sur le continent américain à la frontière qui sépare les États-Unis et le Canada, et au niveau de la Scandinavie en Europe. Ils soufflent à 10 kilomètres d'altitude à l'interface de la troposphère (la couche la plus basse de l'atmosphère où se déroulent les événements météorologiques) et de la stratosphère.

Plus l'écart thermique est marqué entre l'air subtropical et l'air polaire, plus le jet-stream est vigoureux. En été, les différences de température sont moindres qu'en hiver et le jet-stream s'affaiblit. Comme une voile qui faseye sous un vent faible, le jet-stream forme alors plus facilement des ondulations nord-sud.

Mais pourquoi ces lacets se forment-ils en certains endroits et pas en d'autres? Le jet-stream est en réalité influencé par une série de

les masses d'air décroît en été, elles ont tendance à se déformer et leur migration vers l'est ralentit. En toute saison, le jet-stream adopte la forme et la trajectoire des ondes de Rossby.

D'autres ondes se propagent à travers l'atmosphère et les océans. Par exemple, des ondes de gravité naissent d'une perturbation temporaire entre la gravité, qui tire l'atmosphère vers le bas, et d'autres forces qui la poussent vers le haut, comme quand une montagne fait s'élever les vents incidents. Parmi ces ondes, celles dites de Kelvin se produisent dans le Pacifique dans un couloir étroit situé à cheval sur l'équateur. Elles y voyagent d'ouest en est, réchauffent et refroidissent à intervalles réguliers les eaux de surface, et constituent un ingrédient essentiel du phénomène climatique El Niño/Oscillation australe (l'oscillation australe est une variation périodique des pressions mesurées d'un côté et de l'autre du Pacifique; quand l'écart entre ces deux pressions est faible, un événement El Niño se déclenche généralement).

Les boucles du jet-stream engendrent des systèmes météorologiques locaux avançant vers l'est de façon synchrone avec elles. Ce sont les H (pour *high*) et L (pour *low*) des cartes météorologiques, qui pointent des zones de haute et basse pression. Une zone de haute pression coincée dans un sommet du S (on parle de crête) tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et apporte en été un temps sec et chaud. Un système dépressionnaire niché dans le bas du S (ou creux) tourbillonne en sens inverse et engendre un temps humide et frais. Si le jet-stream est affaibli, il peut «caler» et ne plus progresser vers l'est – une configuration dite d'onde stationnaire. Les systèmes météorologiques de haute et basse pression font alors du sur-place, brûlant les terres sous-jacentes ou causant d'incessantes pluies torrentielles et inondations – c'est ce qui est arrivé avec l'ouragan Harvey, au Texas notamment, et l'ouragan Florence au-dessus du centre-est des États-Unis.

UN FACTEUR D'AGGRAVATION

Les événements météorologiques extrêmes surviennent majoritairement quand les boucles des ondes de Rossby, et donc celles du jet-stream, sont fortement amplifiées. En effet, les systèmes de haute et basse pression sont d'autant plus marqués que les crêtes et les creux s'éloignent de la trajectoire moyenne. Dans cette configuration où l'onde est stationnaire, le système de haute pression stagne (on parle alors de situation de blocage). C'est ce qui a causé en juillet 2018 la canicule du sud-ouest des États-Unis et les inondations simultanées survenues dans le coin nord-est du pays. Un autre exemple classique est ce qui s'est passé en juillet 2010 en Asie: tandis qu'une crête se développait au-dessus de la Russie, engendrant records de chaleur, sécheresse et feux de forêt, plus en aval

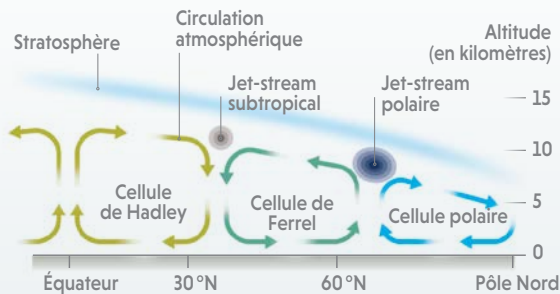
Si le jet-stream est affaibli, ses sinuosités peuvent caler, d'où des situations de blocage

larges ondes qui circulent dans l'atmosphère, créées naturellement par la rotation de la Terre dans le fluide qu'est l'air. Il s'agit des ondes de Rossby, nom donné en l'honneur du météorologue suédo-américain Carl-Gustaf Rossby, qui fut le premier à expliquer dans les années 1930 la physique à grande échelle de l'atmosphère. Ces ondes existent aussi dans les océans.

Les ondes de Rossby atmosphériques s'étendent sur des centaines de kilomètres et se meuvent d'ouest en est dans l'hémisphère Nord. Quand la différence de température entre

LES CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES FIGÉES SUR PLACE

Le jet-stream pilote la météorologie de l'hémisphère Nord. Quand il ondule, il peut créer des zones de haute pression qui provoquent canicules et pluies torrentielles. Les fortes ondulations peuvent être bloquées sur place, ce qui prolonge les conditions difficiles pendant plusieurs jours, en particulier en été. Curieusement, la physique qui préside au phénomène est analogue à celle qui régit la matière à petite échelle, c'est-à-dire la mécanique quantique.



Le jet-stream s'enroule autour de la Terre

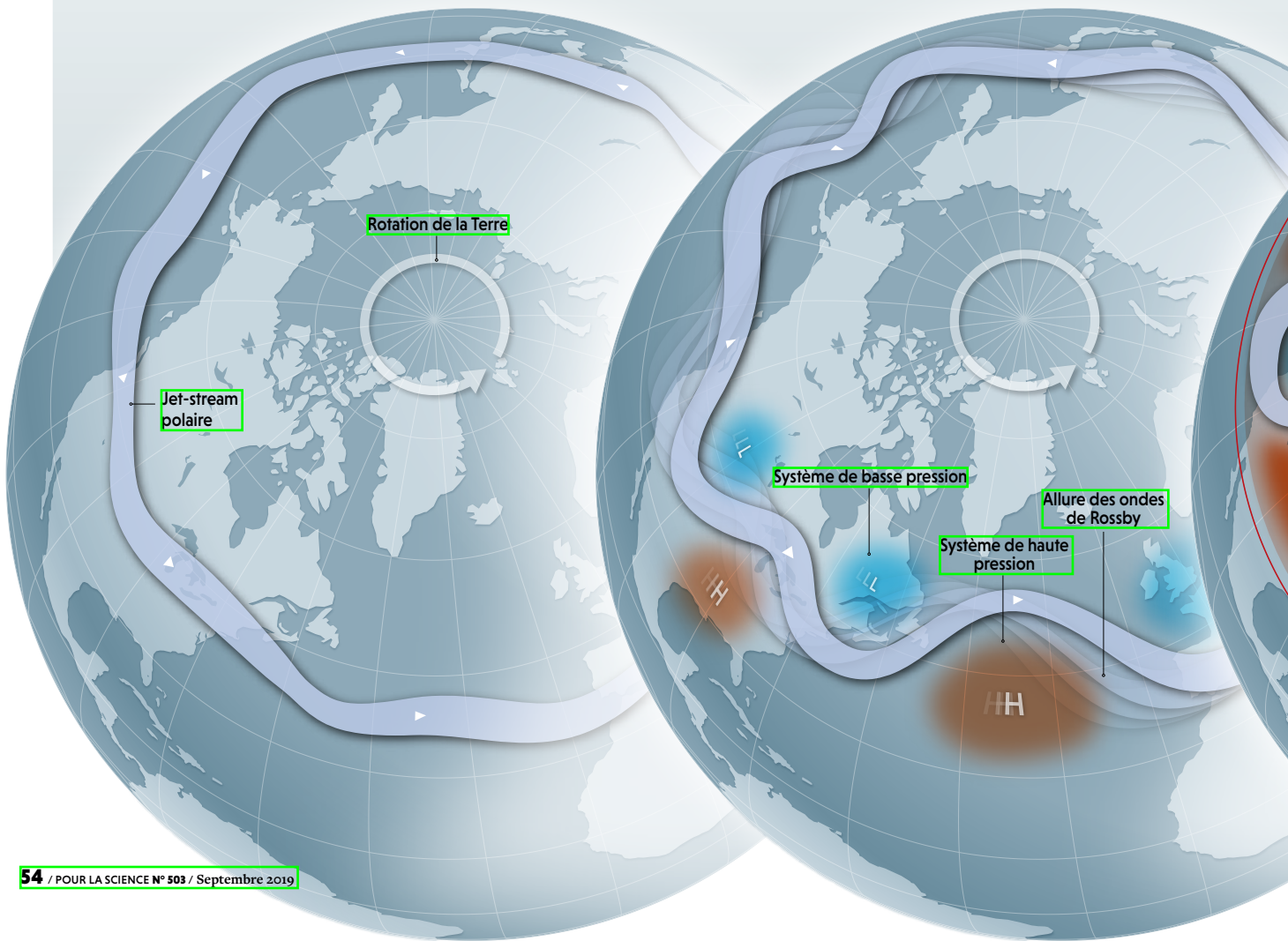
Les jet-streams soufflent entre 30° et 60° de latitude environ, aux frontières des cellules de circulation atmosphérique (voir ci-dessus). Le jet-stream polaire de l'hémisphère Nord va d'ouest en est autour du globe, parfois selon une trajectoire quasi rectiligne et d'autres fois en ondulant légèrement (ci-dessous). Les systèmes météorologiques tendent à suivre ce mouvement.

UN GUIDE D'ONDES DANS LE CIEL

Le guide d'ondes atmosphérique qui piège les ondes de Rossby est mathématiquement similaire à un guide d'ondes qui emprisonnerait un électron. En physique classique, un électron placé à l'intérieur d'une boîte aux murs hauts (représentant des barrières énergétiques élevées) se comporte comme une particule et rebondit d'une paroi à l'autre (A). Mais en physique quantique, un électron se comporte comme une onde piégée dans un guide d'ondes ; il a alors une probabilité non nulle de se trouver à l'extérieur de la boîte (B). Toutefois, plus les murs sont hauts, moins il y a de chance que cet effet tunnel se produise. Le phénomène est similaire à celui où les ondes de Rossby, associées à un jet-stream très sinueux, restent piégées dans un guide d'ondes atmosphérique, ce qui inflige aux continents chaleur ou pluies persistantes.

Les centres de pression enflent

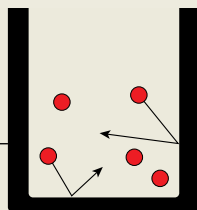
En été, des ondulations prononcées du jet-stream créent des systèmes de basse pression (L pour low) qui apportent de l'air froid et humide, et des systèmes de haute pression (H pour high) amenant de l'air chaud et sec. Il arrive que le jet-stream suive un motif ondulant qui se répète (ci-dessous), qui épouse la forme des ondes de Rossby créées dans l'atmosphère par la rotation de la Terre. Le motif et les conditions météorologiques associées progressent d'ouest en est.



A Physique classique

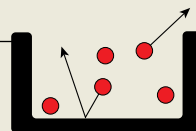
Les murs hauts représentent des barrières d'énergie

Les électrons sont piégés dans la boîte



Murs de plus basse énergie

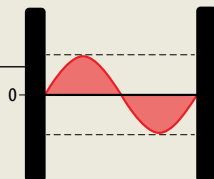
Les électrons peuvent s'échapper grâce à leur énergie propre



B Physique quantique

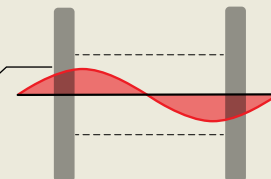
Les murs de haute énergie agissent comme un puissant guide d'ondes

Les électrons sont des ondes qui ont une faible chance de traverser les murs



Les murs de faible énergie agissent comme un guide d'ondes ténu

Les électrons ont une probabilité notable de se trouver à l'extérieur de la boîte

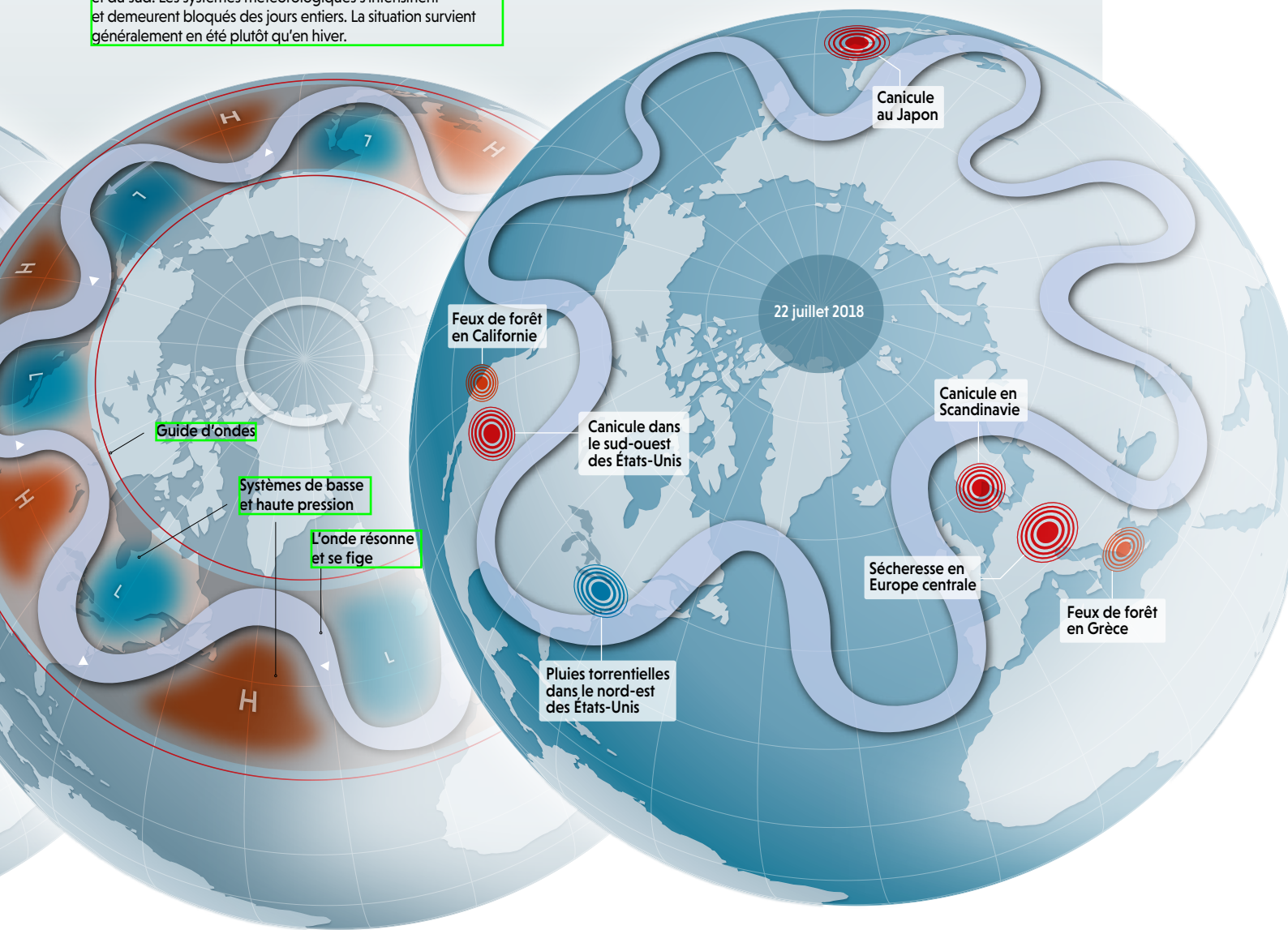


Résonance orangeuse

Des ondes de Rossby de grande amplitude, et les sinuosités du jet-stream qui les suivent, peuvent rester bloquées et former une onde stationnaire. Il arrive en outre que l'atmosphère joue le rôle de guide d'ondes (lignes rouges), ce qui produit un effet de résonance et d'amplification sur le jet-stream. Ses ondulations s'accroissent à la fois en direction du nord et du sud. Les systèmes météorologiques s'intensifient et demeurent bloqués des jours entiers. La situation survient généralement en été plutôt qu'en hiver.

Un mauvais jour

En 2018, un jet-stream résonnant s'est retrouvé bloqué entre la fin du mois de juillet et le début d'août. Il a déclenché ou amplifié des conditions météorologiques extrêmes autour de la planète. À partir du 22 juillet, canicules et sécheresses ont touché plusieurs régions et ont attisé des feux de forêt, tandis que d'autres territoires subissaient de graves inondations.





Fleurs de tournesol (1) et graines rabougries (2) près de Golssen, en Allemagne, victimes de la canicule prolongée de 2018.

du S un creux se déployait au-dessus du Pakistan et a apporté des inondations historiques.

En temps normal, l'amplitude des ondes de Rossby est limitée par l'énergie qu'elles irradient lorsqu'elles s'étendent vers le nord et le sud, et à mesure de leur progression vers l'est. Sous certaines conditions, toutefois, l'atmosphère peut se comporter comme un guide d'ondes. Imaginez une ligne d'axe est-ouest traversant le Canada en son centre et une autre parallèle qui passerait au sud des États-Unis. Une onde de Rossby sinueuse reste bloquée entre ces «murs» et perd peu d'énergie (le câble coaxial qui relie les antennes des toits aux téléviseurs est un autre exemple de guide d'ondes; les ondes électromagnétiques qui transmettent le signal de télévision sont en grande partie confinées dans la paroi cylindrique du câble et là aussi se propagent presque sans perte d'énergie). Ce confinement verrouille le jet-stream et les puissants systèmes de haute et basse pression.

Quand les ondes font du sur-place (comme c'est le cas avec les ondes stationnaires), les boucles enflent sous certaines circonstances. Ce phénomène, qui survient surtout en été, est nommé amplification quasi résonante (AQR). Il y a plusieurs années, Vladimir Petoukhov et ses collègues, à l'institut de Potsdam de recherche sur les effets du changement climatique, en Allemagne, ont montré que les conditions favorisant une AQR dépendaient de la forme du jet-stream. Or le réchauffement climatique aurait une influence sur la forme du jet-stream et donc sur l'AQR.

Pour comprendre pourquoi, il faut faire appel aux mêmes mathématiques qui ont été développées au début du xx^e siècle pour résoudre certains problèmes en mécanique quantique. J'aime particulièrement l'idée qu'il existe un lien entre la météorologie et ce champ de recherche. J'ai débuté ma carrière comme

physicien théoricien avant de m'intéresser aux sciences de l'atmosphère; cela me rassure donc de penser que les vieux manuels de mécanique quantique qui dorment dans ma bibliothèque sont toujours utiles dans mon travail.

Saisir en quoi les mathématiques d'une onde atmosphérique et d'un électron sont similaires va nous aider à comprendre pourquoi les sécheresses et les inondations s'aggravent. Imaginez un électron en physique classique et dressez des murs de très haute énergie autour de lui (à l'aide de champs magnétiques par exemple): vous l'aurez emprisonné à l'intérieur d'une boîte dont il ne pourra s'échapper. La particule sera condamnée à rebondir éternellement entre les parois.

DES SIMILITUDES AVEC LA PHYSIQUE QUANTIQUE

En mécanique quantique, les choses sont différentes. L'électron n'a plus de position bien définie. À la place, la probabilité de trouver l'électron en un endroit donné est déterminée par l'équation de Schrödinger, qui est une équation d'onde. Si vous placez un électron entre des murs de haute énergie, il existera donc une certaine chance de le trouver en chaque point de la boîte. Or cette probabilité est décrite par une courbe sinusoïdale, autrement dit par un S couché. Cela ne vous rappelle rien? L'électron se comporte à la fois comme une particule et comme une onde.

Quelque chose d'intéressant se produit lorsque les murs de la boîte sont de hauteur (c'est-à-dire d'énergie) modeste. Dans ce cas, l'électron a une probabilité faible mais non nulle de pénétrer les parois, et même de les traverser si elles ne sont pas trop épaisses. C'est l'«effet tunnel». C'est comme si vous lanciez une balle de tennis contre un vrai mur et qu'elle passait à travers. Finalement, l'électron est majoritairement confiné à l'intérieur de la

boîte, mais «fuite» un peu au niveau de chaque mur. Bienvenue dans le monde étrange de la mécanique quantique.

La physique à l'œuvre sur cet exemple à une dimension ressemble à ce qui se produit à trois dimensions dans le cas du guide d'ondes – tel un câble coaxial. L'astuce mathématique qui permet de résoudre les équations qui décrivent ces objets, est connue sous le nom d'approximation WKB (née en 1926 sous la plume de Gregor Wentzel, Hendrik Kramers et Léon Brillouin, et utilisée dans divers contextes en physique quantique).

Au début des années 1980, David Karoly, aujourd'hui au CSIRO, en Australie, et Brian Hoskins, de l'université de Reading, en Angleterre, ont montré que l'atmosphère pouvait se comporter comme un guide d'ondes pour les ondes de Rossby bloquées (ou stationnaires) et aux longueurs d'onde assez courtes (correspondant environ à la largeur de la partie continentale des États-Unis, soit un huitième à un sixième du tour complet de l'hémisphère Nord).

L'onde de Rossby stationnaire est alors piégée à l'intérieur du guide d'ondes, avec une perte minimale d'énergie fuyant par les bords nord et sud – à l'instar d'un électron dans une boîte. Dans cette situation, les ondes s'amplifient en raison de l'AQR. Immobilisé, le serpent d'air aux dimensions continentales crache alors son venin dans les crêtes et les creux et entraîne des calamités météorologiques qui perdurent

situation d'un guide d'ondes pour ondes stationnaires de Rossby surviennent surtout en été. Lors de cette saison, le jet-stream est rarement un vent solitaire soufflant d'ouest en est. La plupart du temps, il alterne en fait entre deux couloirs, l'un situé au nord et le second au sud de sa latitude moyenne.

A l'aide de l'approximation WKB, l'équipe de Vladimir Petoukhov a montré que c'est précisément dans ces conditions de jet à «double chemin» que l'atmosphère peut se comporter comme un guide d'ondes pour les ondes de Rossby de courte longueur d'onde. L'amplitude de ces ondes est généralement faible: les boucles ne s'étendent pas très loin au nord ou au sud. Mais si une boucle initiale est engendrée lorsqu'une masse d'air se déplaçant d'ouest en est atteint les montagnes Rocheuses ou les Alpes, ou lorsque cette masse d'air rencontre un fort contraste de température de surface à la frontière entre la terre et l'océan, les ondes de Rossby peuvent s'amplifier rapidement grâce au mécanisme de l'AQR.

LES CONDITIONS FAVORABLES À L'AQR ONT ÉTÉ PLUS FRÉQUENTES

Comment savoir à l'avance si une AQR va se produire? Les conditions favorables au phénomène varient en fait d'une année sur l'autre. Elles dépendent surtout de la configuration nord-sud des variations de température dans la basse atmosphère – des données que les modèles climatiques anticipent correctement.

En 2017, mes collègues et moi avons montré que les conditions favorables à l'AQR avaient été de plus en plus souvent réunies au cours des dernières décennies. Les simulations climatiques indiquent que cette tendance est pilotée par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre au fil du temps. Des facteurs naturels tels que les fluctuations du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques, ainsi que des paramètres humains tels que la pollution atmosphérique au dioxyde de soufre notamment, ont également joué un rôle. Les simulations, appelées CMIP5, sont le résultat d'une modélisation réalisée par plus de cinquante équipes dans le monde pour le dernier rapport du Giec (le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Les températures enregistrées aux stations météorologiques et les simulations numériques montrent que le changement climatique réchauffe l'Arctique plus vite que le reste de l'hémisphère Nord; ce phénomène est connu sous le nom d'amplification arctique. Or une différence de température moins importante entre les latitudes moyennes et polaires ralentit le jet-stream et favorise donc l'installation de conditions météorologiques persistantes. Des conditions qui sont associées au double cheminement du jet-stream et à l'AQR.

L'augmentation des gaz à effet de serre favorise l'amplification quasi résonante

plusieurs jours. L'approximation WKB, clé de la résolution de problèmes de guide d'ondes en mécanique quantique, est tout aussi utile pour comprendre le fonctionnement des ondes de Rossby dans cette situation.

Tout cela posé, il est facile de voir en quoi le changement climatique influe sur les ondes stationnaires, qui entraînent des épisodes météorologiques extrêmes. En 2013, l'équipe de Vladimir Petoukhov s'est appuyée sur les travaux de David Karoly et Brian Hoskins et a montré que les conditions propices à la

▢ Cette tendance à la hausse contribue à expliquer la vague d'événements météorologiques estivaux extrêmes et de longue durée que l'on a observés autour de l'hémisphère Nord au cours des deux dernières décennies. Des scientifiques ont récemment montré que les conditions de l'AQR étaient liées à la vague de chaleur européenne de 2003, aux feux de forêt de 2010 en Russie et aux inondations consécutives au Pakistan, à la sécheresse qui a frappé l'Oklahoma et d'autres régions des États-Unis en 2011, ainsi qu'aux incendies de forêt de Californie en 2015 et ceux d'Alberta en 2016. On peut maintenant ajouter à cette liste les feux de forêt sans précédent de Californie en 2018. Les changements climatiques causés par l'homme ont accru la probabilité de ces calamités météorologiques d'environ 50% au cours des dernières décennies.

QUELLE EST L'INFLUENCE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

Au vu de ce qui précède, il semblerait que les épisodes météorologiques extrêmes ne feront qu'empirer. Des principes physiques de base laissent penser que c'est bien ce qui va se passer. Par exemple, une atmosphère plus chaude retient davantage d'humidité et déverse ensuite plus de pluies torrentielles. Et une planète plus chaude signifie plus de vagues de chaleur, intenses et longues. Mais qu'en est-il de l'onde stationnaire et de l'AQR ?

« Les prédictions sont difficiles, surtout en ce qui concerne l'avenir », auraient dit le grand physicien Niels Bohr et par la suite la légende du base-ball Yogi Berra. Dans un article publié en octobre 2018, mes collègues et moi avons analysé comment les événements associés à l'AQR ont des chances d'être altérés par le changement climatique. Nous nous attendions à ce que la tendance à la hausse continue avec la même vigueur. Mais ce n'est pas ce que nous avons découvert.

Les experts du Giec et des simulations CMIP5 envisagent l'avenir du climat sous différents scénarios, du plus optimiste où les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) sont stoppées dès aujourd'hui à un monde qui s'entête à rejeter de plus en plus de CO_2 . En partant de ce dernier scénario qualifié de *business as usual* (où l'on extrapole l'augmentation de CO_2 à partir des valeurs des dernières décennies), nous sommes parvenus à la conclusion que les chances de voir émerger les conditions propices à l'AQR allaient stagner jusqu'en 2050... avant de réaugmenter ensuite.

Ce basculement de régime puise sa source dans un autre facteur humain, déterminant mais parfois négligé, du changement climatique : les polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre, qui sont produits par la combustion du charbon et d'autres activités

industrielles. Ces polluants forment des particules nommées aérosols qui dérivent dans l'atmosphère et réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace, refroidissant ainsi la Terre.

La pollution aux aérosols a été responsable des pluies acides dans les années 1950 à 1970 dans le nord-est des États-Unis. La loi américaine sur la lutte contre la pollution atmosphérique (Clean Air Act) imposait aux installations industrielles américaines d'équiper les cheminées d'épurateurs afin d'éliminer le dioxyde de soufre des émissions. Cela a

La pollution par les aérosols enrayerait l'aggravation de l'AQR jusqu'en 2050

permis de sauver des forêts, des lacs et des cours d'eau, mais en retour a mis en relief le rôle joué par les aérosols dans le climat. Les particules reflétant la lumière du soleil, leur raréfaction dans le ciel a contribué à accélérer le réchauffement climatique à partir des années 1970.

Une grande partie du reste du monde – et surtout la Chine, qui compte près de la moitié de toutes les centrales au charbon actuelles – fonctionne encore avec d'anciennes pratiques industrielles. Le scénario habituellement envisagé par le Giec suppose que des pays tels que la Chine continueront à brûler du charbon, contribuant ainsi à une augmentation des émissions de CO_2 qui en ferait plus que tripler le niveau préindustriel d'ici à la fin du XIX^e siècle. Le scénario suppose également, toutefois, que ces industries installeront des épurateurs au cours des prochaines décennies.

Cela entraînera une réduction spectaculaire des aérosols d'ici au milieu du siècle, et accélérera le réchauffement. L'effet sera particulièrement important aux moyennes latitudes en été, lorsque la lumière du soleil est maximale ; une grande partie ne sera plus réfléchi. Dans certaines simulations numériques, le réchauffement estival des latitudes moyennes est si notable qu'il dépasse le réchauffement de l'Arctique. L'amplification arctique diminue voire s'arrête. Cela stabiliserait le phénomène

BIBLIOGRAPHIE

M. E. Mann et al., Projected changes in persistent extreme summer weather events : The role of quasi-resonant amplification, *Science Advances*, vol. 4(10), article eaat3272, 2018.

D. Coumou et al., The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation, *Nature Communications*, vol. 9, article 2959, 2018.

M. E. Mann et al., Influence of anthropogenic climate change on planetary wave resonance and extreme weather events, *Scientific Reports*, vol. 7, article 45242, 2017.

J. Master, Le jet-stream polaire se dérègle-t-il ?, *Pour la Science*, n° 449, pp. 56-63, mars 2015.

de l'AQR, voire le réduirait – et finalement adoucissait le jet-stream.

Cette évolution semble être une bonne nouvelle. Mais il s'agit en réalité d'un pacte faustien. L'effet positif quasi immédiat se paye à long terme. Au milieu du siècle, les aérosols auront presque tous disparu et, à partir de ce moment, la hausse des gaz à effet de serre pourra livrer tout son potentiel en termes d'élévation des températures. Une fois encore, la hausse s'accélérera dans la région polaire. L'amplification arctique reprendra et les événements de l'AQR – les régimes climatiques durables, intenses, chauds, secs et humides – se multiplieront à nouveau. À la fin du siècle, ils seront environ 1,5 fois plus fréquents qu'aujourd'hui. Le changement sera particulièrement marqué en été, dans les latitudes moyennes. Or c'est là que vivent la plupart des populations et où l'on fait pousser de nombreuses cultures – dont beaucoup résistent mal à la canicule.

LE FUTUR EST ENTRE NOS MAINS

Y a-t-il une issue? Si le monde agit maintenant pour sortir de sa passivité et s'engage vers une diminution significative des émissions de carbone dans l'atmosphère, nous pouvons encore éviter un réchauffement catastrophique de 2 °C, ce qui nous épargnerait probablement

une aggravation des événements AQR. La voie la plus sûre (et la plus économique) consiste à limiter immédiatement l'usage de combustibles fossiles et les autres activités humaines qui enrichissent l'atmosphère en gaz à effet de serre.

Le monde doit parfois prendre des décisions en dépit des incertitudes. Certaines simulations indiquent une augmentation beaucoup plus importante (plus de trois fois) du nombre d'événements AQR, tandis que d'autres montrent en réalité une diminution. La disparité des résultats provient en grande partie des différentes façons dont les modèles climatiques traitent les aérosols. Les prévisions finiront-elles par converger? Nous ne le savons pas encore. On peut soutenir que, compte tenu de l'incertitude et du risque potentiel, si le pire des scénarios survient, la solution la plus sage consiste à réduire fortement les émissions.

Bien entendu, il serait utile de réduire les incertitudes. Cela revient, au moins en partie, à améliorer notre compréhension de la physique. En l'occurrence celle des aérosols et de la façon dont ils diffusent le rayonnement solaire – des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Encore une fois, cela requiert de comprendre la physique du comportement des ondes. La boucle est bouclée. ■





**MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE
NATURELLE**

exposition
 3 avril 2019 —
 5 janvier 2020

OCCÉAN

UNE
PLONGÉE
INSOLITE

**GRANDE GALÉRIE
DE L'ÉVOLUTION**

**POUR LA
SCIENCE**

Dompter les photons grâce à la topologie

Les performances des techniques de communication fondées sur des systèmes optiques plafonnent. Mais un domaine de recherche récent, la photonique topologique, ouvre la voie à un nouvel élan d'innovations.

En 2018, Mordechai Segev et des collègues ont mis à profit des propriétés dites topologiques pour guider la lumière (*en rouge sur ce schéma*) sur les bords d'un réseau de résonateurs optiques annulaires mesurant 125 micromètres de côté, et ainsi obtenir une émission de lumière laser (*en haut à gauche*).

L'ESSENTIEL

> Grâce aux outils mathématiques de la topologie, les physiciens expliquent des propriétés de conductivité exotiques de certains matériaux, où les électrons circulent uniquement à leur surface et dans une unique direction.

> L'enjeu de la photonique topologique est de s'inspirer

de ces matériaux pour concevoir des systèmes où la lumière ne peut se propager que dans une seule direction.

> Il serait alors possible de réaliser des micro-isolateurs optiques, des éléments indispensables pour fabriquer des supercalculateurs optiques très performants.

LES AUTEURS



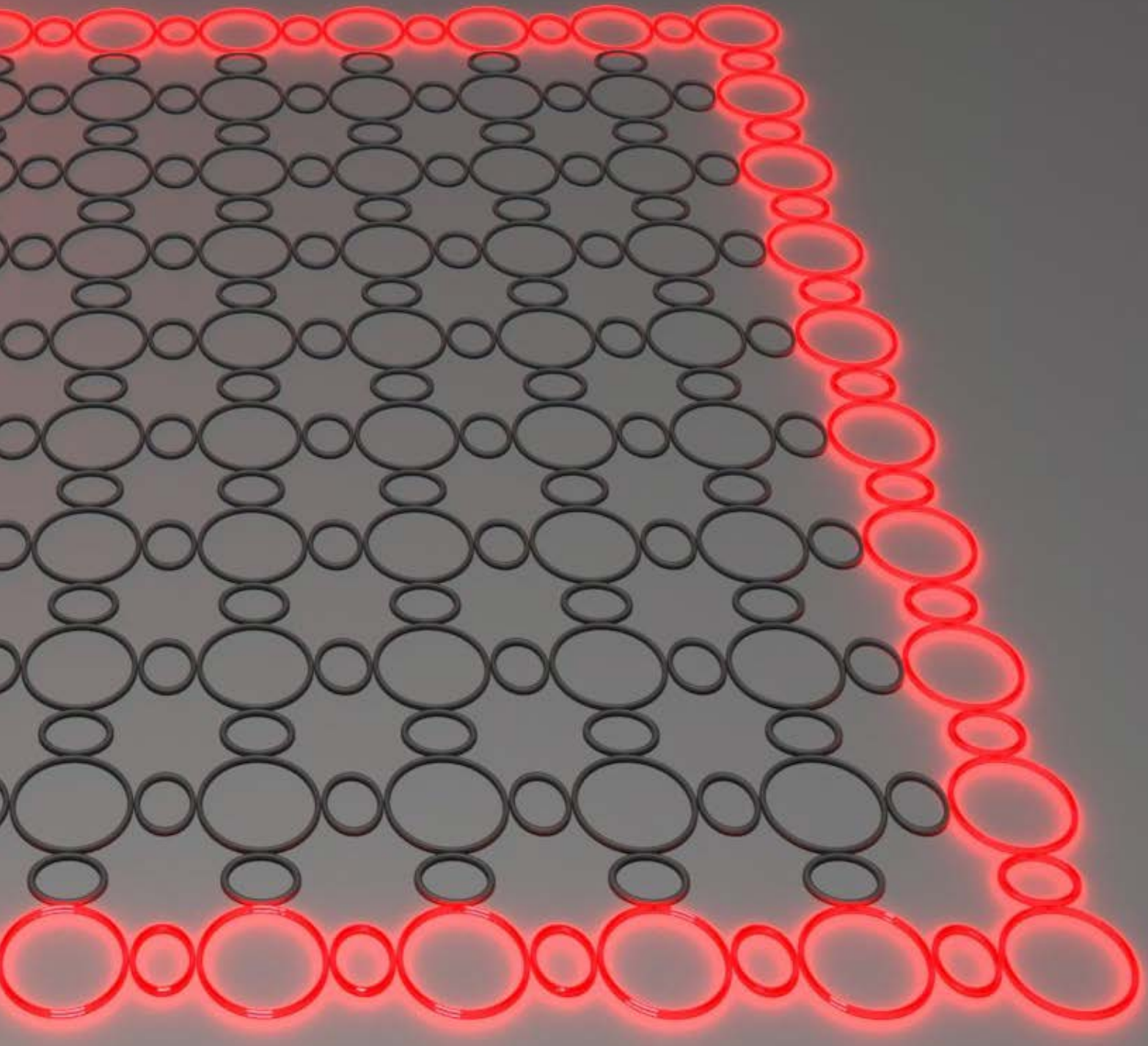
OLIVIER BLEU
doctorant
à l'institut Pascal,
à Clermont-Ferrand



DMITRY SOLNYSHKOV
enseignant
chercheur à
l'institut Pascal



GUILLAUME MALPUECH
directeur de
recherche du CNRS
à l'institut Pascal



Depuis les années 1970, la société est entrée dans une «ère de l'information» où les technologies jouent un rôle crucial pour diffuser et traiter de grandes quantités de données (du texte, des images, des vidéos, du son, etc.). Ainsi, alors qu'en 1986 les capacités d'échange d'information par les réseaux de télécommunication à travers la planète étaient de 2,2 exabits par an (1 exabit correspond à 10^{18} bits), elles sont passées à 520 exabits par an en 2007 et elles continuent de croître à grande vitesse.

Cependant, les techniques actuelles de transport et de traitement de l'information se rapprochent de leurs limites. Comment alors répondre à la demande toujours croissante? Une piste repose sur les systèmes optiques, mais des obstacles limitent encore leurs performances. Un domaine de recherche récent, la photonique topologique, pourrait résoudre certaines de ces difficultés. Il s'inspire d'outils mathématiques pour développer de nouvelles approches et des innovations prometteuses.

Les techniques actuelles de transport de l'information s'appuient sur deux inventions du XIX^e siècle: la radio, inventée par l'Italien Guglielmo Marconi en 1894, et le télégraphe, breveté par l'Américain Samuel Morse en 1840.

La première repose sur la maîtrise des ondes électromagnétiques et a permis de transporter des informations de la façon la plus rapide qui soit: à la vitesse de la lumière. On a alors utilisé des ondes hertziennes, émises et détectées via des antennes où circulent des courants électriques alternatifs. Grâce à différents progrès techniques, ces antennes ont été miniaturisées: avec une taille de l'ordre du centimètre, elles émettent à des fréquences plus élevées, dans le domaine du gigahertz. Elles équipent aujourd'hui nos téléphones portables et les bornes wifi. Si le débit de transfert d'informations atteint 100 mégabits par seconde, la distance de propagation de ces ondes est limitée à quelques centaines de mètres.

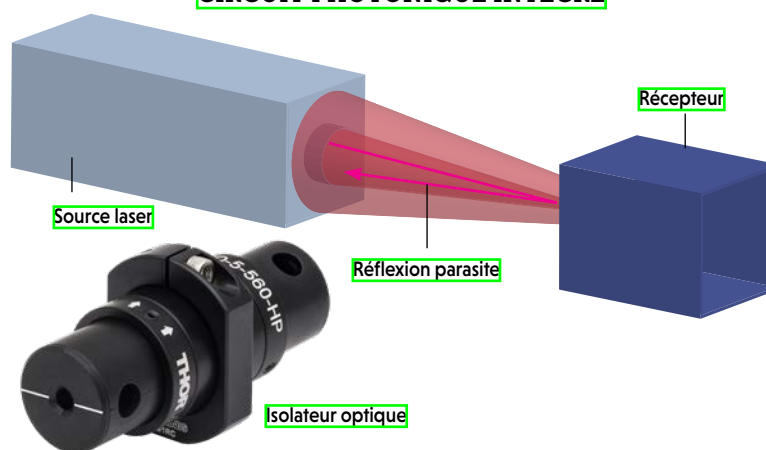
LA RÉVOLUTION DU LASER

Le télégraphe est fondé sur le transport d'un signal électrique par des câbles conducteurs tels que ceux utilisés aujourd'hui par le réseau téléphonique. Au cours des décennies 1960 et 1970, plusieurs découvertes dans le domaine de la photonique ont révolutionné cette technique en la transposant à la lumière. Un laser crée un intense faisceau de lumière dont les modulations portent l'information, lumière que guident et acheminent des fibres optiques, à des longueurs d'onde dites télécoms (environ 1,5 micromètre), sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Ces fibres peuvent être mises en parallèle, et

chacune a un débit pouvant atteindre 100 gigabits par seconde, au moins 1000 fois supérieur au transport par ondes dans l'air et au transport électrique par câble.

Si le transport de l'information est un enjeu majeur, son traitement en est un autre tout aussi important. La méthode la plus efficace pour manipuler les données, codées sous forme binaire, repose sur l'utilisation de transistors électriques. Ces dispositifs sont des sortes d'interrupteurs dont la conductivité est commandée par une tension électrique. En réalisant un circuit composé d'un grand nombre de ces

CIRCUIT PHOTONIQUE INTÉGRÉ



interrupteurs, on obtient un processeur logique: un ordinateur. La capacité de calcul, et donc de traitement de l'information, est donnée par le nombre de transistors que l'on peut intégrer à un processeur et la fréquence de cadencage, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le système est capable de manipuler des données. Les premiers ordinateurs fabriqués avant la Seconde Guerre mondiale utilisaient des interrupteurs mécaniques. Puis des composants purement électriques, des tubes à vide, ont été utilisés. Comme ces interrupteurs n'étaient pas petits, il était impossible d'en rassembler plus de quelques dizaines de milliers.

La véritable révolution est venue avec l'utilisation de transistors constitués de matériaux dits semi-conducteurs qui ont permis une miniaturisation extrême (jusqu'à 10 nanomètres). Des milliards de ces transistors sont aujourd'hui intégrés sur un seul processeur. On peut faire fonctionner en parallèle des milliers de ces processeurs, comme c'est le cas dans les cartes graphiques. La fréquence de cadencage atteint quelques gigahertz (quelques milliards de bits par seconde), mais cette limite ne sera pas dépassée: les perspectives de progrès dans le cadre de la technologie actuelle sont faibles, alors que les besoins en calculs du monde moderne augmentent de façon exponentielle.

Des approches et des concepts nouveaux sont à l'étude, par exemple l'informatique

Dans un circuit photonique standard, un laser sert de source de lumière qui est transmise à un récepteur ou à une fibre optique. Mais à chaque interface, une partie de la lumière est réfléchie et retourne dans la cavité laser dont elle perturbe le fonctionnement. On peut insérer un isolateur optique à la sortie du laser pour bloquer la lumière parasite. Mais sa taille centimétrique est un obstacle pour la conception de microcircuits photoniques.

quantique. Mais cette approche repose sur des principes de la physique quantique (la superposition des états et l'intrication) qu'il est très difficile d'intégrer dans un dispositif macroscopique. Quelques premiers prototypes ont vu le jour ces dernières années, mais ils ne manipulent qu'un nombre limité de bits quantiques (ou qubits).

DES OBSTACLES SUR LA ROUTE DE LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE

Une autre approche, moins radicale, consiste à développer une photonique intégrée où l'information serait transportée et au moins partiellement traitée de façon photonique. On remplacerait alors les électrons des semi-conducteurs par les photons de la lumière. Il serait alors possible d'atteindre des fréquences de cadencage nettement plus élevées, proches du térahertz (1000 gigahertz). La contrepartie est que ces systèmes sont actuellement plus gros et plus gourmands en énergie que ceux constitués de semi-conducteurs. Avant de réaliser un supercalculateur photonique intégré, de nombreux obstacles sont à franchir, l'un des plus importants étant lié à ce qu'on nomme le « caractère réciproque du transport de la lumière ». Cependant, grâce à des idées issues de la topologie, une branche des mathématiques, il est en passe d'être résolu.

dont elle perturbe le fonctionnement (*voir la figure page ci-contre*).

Pour obtenir un transport non réciproque, une solution est d'ajouter une force externe qui impose une direction de mouvement aux particules. Pour les électrons, porteurs d'une charge électrique, on utilise un champ électrique qui oriente leur flux. Rien d'aussi simple n'est envisageable pour les photons, qui sont des particules neutres. Une solution consiste à placer un « isolateur optique » entre le laser et la fibre, composant de taille centimétrique.

De façon générale, ces réflexions parasites, la réciprocity du transport photonique et l'absence d'isolateurs optiques miniaturisés et intégrables sont rédhibitoires pour la réalisation de circuits photoniques intégrés comportant de nombreux composants logiques. Pour les physiciens, le défi est donc de concevoir des systèmes présentant de façon intrinsèque un transport non réciproque de la lumière.

Des phénomènes physiques présentant un tel comportement sont connus depuis longtemps. C'est le cas de la superfluidité, découverte en 1937 par le physicien soviétique Piotr Kapitsa, à savoir la perte de viscosité d'un fluide à très basse température. Les propriétés de ce fluide sont déterminées par des processus quantiques, où l'énergie des interactions des particules est plus élevée que l'énergie cinétique du superfluide en mouvement. Le fluide présente alors un comportement collectif de toutes ses particules, qui inhibe les processus de diffusion à l'origine du désordre dans le milieu. Or, dans un fluide classique, ce désordre dissipe l'énergie du mouvement des particules et est à l'origine de la viscosité du fluide. Ces perturbations étant absentes dans le superfluide, la viscosité est alors nulle. Les molécules du superfluide s'écoulent dans une seule direction, le transport est non réciproque.

LE DÉFI DU TRANSPORT NON RÉCIPROQUE

En principe, il est possible de créer un superfluide de lumière dont le flux est insensible au désordre. Pour ce faire, il faut engendrer une interaction photon-photon assez importante et avoir une forte densité de ces particules. Les lois qui régissent le comportement des particules élémentaires indiquent qu'un photon n'interagit pas directement avec un autre photon. Il est néanmoins possible de satisfaire cette condition en considérant des « excitons-polaritons ».

Il s'agit de quasiparticules, c'est-à-dire des entités abstraites qui décrivent des comportements collectifs de particules et qui ont des propriétés analogues à celles de particules réelles. Parmi les quasiparticules les plus connues, les phonons rendent compte des vibrations dans un matériau, et les trous traduisent des lacunes >

Avec la photonique intégrée, les ordinateurs traiteront 1000 fois plus de données par seconde

Lorsqu'une particule se propage dans l'espace libre, toutes les directions de propagation sont équivalentes. Si un photon se propage dans une fibre optique dans un sens et y rencontre un défaut ou une interface avec un capteur, il pourra être rétrodiffusé et se propager dans le sens opposé. Le caractère réciproque du transport de la lumière correspond à cette absence de direction privilégiée de propagation. C'est un problème pour les systèmes photoniques : par exemple, lorsque la lumière produite par un laser est injectée dans une fibre optique, le changement d'indice optique fait qu'une partie de la lumière est réfléchi et retourne dans le laser

formées par des électrons absents dans certains matériaux (métaux ou semi-conducteurs). Un électron (de charge négative) et un trou (de charge positive) fortement liés constituent un exciton. Le système formé par un exciton interagissant fortement avec un photon est nommé exciton-polariton. Et des excitons-polaritons peuvent interagir les uns avec les autres *via* leur partie électronique.

En 2010, l'équipe d'Alberto Bramati, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, a réussi à produire un superfluide d'excitons-polaritons à basse température. Puis, en 2017, Daniele Sanvitto, du laboratoire CNR Nanotec, à Lecce, en Italie, et ses collègues ont obtenu ce comportement à température ambiante. L'inconvénient de ces superfluides de lumière est qu'ils nécessitent beaucoup d'énergie pour créer un fluide de haute densité, ce qui rend leur utilisation pratique peu envisageable et pertinente.

LA TOPOLOGIE AU SECOURS DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

Pour les physiciens, les travaux sur les superfluides ont aussi été l'occasion de s'initier aux concepts de la topologie et de généraliser leur utilisation dans l'étude de la matière condensée. La topologie est la branche des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques globales d'un objet que l'on peut déformer à volonté (sans le déchirer ou en recoller des parties). Dans ce genre de transformations, les distances ou les angles ne sont pas préservés. En revanche, d'autres quantités sont conservées, comme le nombre de trous à travers une surface. Ainsi, un tore peut être transformé en tasse et le trou du premier devient l'anse de la seconde. Avec des déformations continues, il est impossible de faire disparaître le trou ou d'en créer un deuxième.

Les physiciens et les mathématiciens ont noté une analogie fondamentale entre les propriétés topologiques et le fait que les caractéristiques d'un superfluide, comme sa viscosité nulle, résultent d'un comportement global et non défini localement (comme le serait l'angle obtenu à l'intersection de deux droites). Il est ainsi possible de définir des invariants topologiques dans des systèmes physiques. Les outils de la topologie ont dès lors été utilisés pour mieux comprendre la matière.

Par exemple, on observe expérimentalement des vortex (des tourbillons de matière) au sein des superfluides, phénomène qui avait été prévu en 1947 par Lars Onsager, chercheur d'origine norvégienne. Ces excitations ont un moment cinétique quantifié, c'est-à-dire que la vitesse de rotation du fluide autour de l'axe du vortex ne peut prendre que certaines valeurs. On retrouve cette idée en topologie avec le nombre d'enroulements (qui définit combien de fois une courbe enlace un objet). Et si l'on regarde la fonction d'onde du superfluide, c'est-à-dire l'objet

mathématique qui décrit le comportement quantique du superfluide, on constate qu'elle s'annule au centre du vortex. Conséquence: une fois qu'un vortex est créé, il ne peut pas être éliminé par une déformation continue de la fonction d'onde, de la même façon que le trou de la tasse. On parle alors de défauts topologiques.

Ces observations sont plus que des analogies: il est possible d'utiliser les outils de la topologie pour décrire efficacement des superfluides, mais aussi des supraconducteurs (matériaux où le courant électrique circule sans résistance). Ces dernières décennies, la topologie a aussi été fondamentale pour l'étude et la compréhension des «isolants topologiques». Ces nouveaux matériaux se comportent comme des isolants électriques dans leur volume, mais comme des conducteurs sur leurs bords et la circulation des électrons n'y est possible que selon une unique direction.

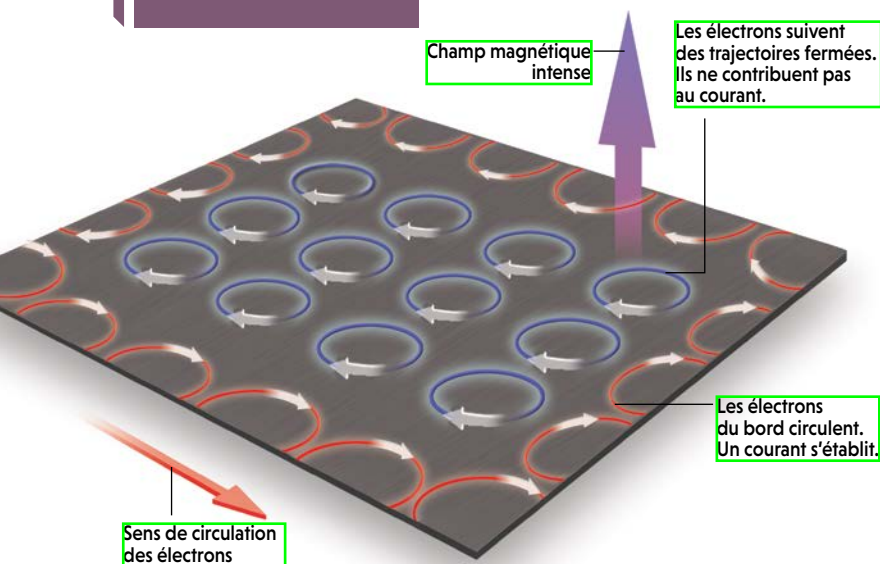
Les isolants topologiques présentent aussi des «vortex», mais d'un type particulier. Ces vortex ne sont pas des tourbillons de matière comme précédemment. Ils sont associés à la fonction d'onde d'une particule de l'isolant dans l'espace réciproque des impulsions, un espace abstrait plus approprié pour décrire des ondes que l'espace tridimensionnel ordinaire. Dans l'espace réciproque des impulsions, un objet, ici la fonction d'onde, n'est pas représenté en fonction des coordonnées d'espace et de temps, mais en fonction de son énergie et de son impulsion ou vecteur d'onde (qui indique la direction de propagation de l'onde et est inversement proportionnel à sa longueur d'onde). Les vortex des isolants topologiques sont caractérisés par un invariant topologique quantifié, le «nombre de Chern», assez similaire au nombre d'enroulements des vortex d'un superfluide.

Historiquement, Klaus von Klitzing, alors au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a identifié les premiers isolants topologiques en 1980, en mettant en évidence l'effet Hall quantique. Il a été récompensé par le prix Nobel en 1985 pour cette découverte. L'effet est

Grâce à la protection topologique, le courant circule malgré la présence d'impuretés

L'EFFET HALL QUANTIQUE

En 1879, le physicien américain Edwin Hall a découvert la version classique de l'effet qui porte son nom. Il a appliqué un champ électrique au matériau conducteur afin de faire circuler ses électrons, tandis que le dispositif était placé dans un champ magnétique perpendiculaire. Ce dernier exerce sur les électrons une force dite de Lorentz, qui les dévie



dans la direction orthogonale aux deux champs. Cela donne naissance à un courant et une tension électrique transverse, dont la résistance associée, dite de Hall, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

En 1980, Klaus von Klitzing, au Laboratoire des champs magnétiques intenses, à Grenoble, a repris cette expérience dans des conditions particulières : le matériau, très mince et donc quasi bidimensionnel, est refroidi à une température proche du zéro absolu et soumis à un champ magnétique intense. Il a remarqué que la résistance de Hall est quantifiée : elle augmente par paliers quand on augmente l'intensité du champ magnétique. En effet, lorsque le champ magnétique est assez intense, la trajectoire des électrons se courbe assez pour se refermer. Ils sont donc localisés et ne participent pas à la conduction électrique. Ces états électroniques sont appelés « niveaux de Landau » et leur énergie est quantifiée. En revanche, les électrons du bord forment des demi-orbitales et peuvent se déplacer dans une unique direction de propagation définie par l'orientation du champ magnétique.

L'aspect remarquable de cette découverte est que la conductivité de ces états de bord est rigoureusement quantifiée et proportionnelle à un nombre (un invariant topologique), qui dépend de l'état des électrons au sein du matériau bidimensionnel et non sur le bord. Les propriétés de ce courant ont donc un caractère global. Il est alors topologiquement protégé : une impureté n'empêche pas sa circulation.

observé en partant d'un matériau semi-conducteur très plat et considéré bidimensionnel, soumis à un champ magnétique orthogonal qui impose une trajectoire courbée aux électrons. À l'intérieur du matériau 2D, les électrons sont piégés dans des trajectoires circulaires et ne contribuent pas à l'établissement d'un courant : le matériau est isolant. En revanche, sur les bords, le champ magnétique amène les électrons à suivre le bord selon un sens imposé par l'orientation du champ magnétique : le matériau est conducteur (voir l'encadré ci-dessus).

ISOLANT EN VOLUME, CONDUCTEUR EN SURFACE

On a d'abord cru que ce phénomène d'isolant en volume, mais conducteur sur les bords, était intimement associé à cette configuration particulière des trajectoires fermées pour les électrons de l'effet Hall quantique. Mais en 1988, le chercheur britannique Duncan Haldane, Prix Nobel de physique en 2016, a démontré que ce phénomène était beaucoup plus général.

Mais pourquoi tel matériau est-il conducteur, isolant ou isolant topologique ? Pour le comprendre, il faut évoquer la théorie des bandes. Dans un atome isolé, les électrons, vus comme des ondes, n'accèdent qu'à des énergies particulières, discrètes, déterminées par la

physique quantique. Dans un matériau doté d'un réseau cristallin, ces ondes interfèrent et les énergies accessibles aux électrons s'étendent à des intervalles continus, ou bandes, séparées par des domaines de valeurs d'énergie interdites aux électrons, domaines nommés bandes interdites ou « gaps ». Selon le remplissage des bandes par les électrons et la disposition des bandes, le matériau est conducteur, isolant ou semi-conducteur (voir l'encadré page 66).

A partir des années 1980, les physiciens ont constaté que le spectre d'énergie des bandes était insuffisant pour décrire tous les aspects de la conductivité, et notamment le cas des isolants topologiques. Ils ont compris que la structure des fonctions d'ondes associées aux électrons avait aussi son importance.

L'aspect topologique émerge quand on considère une grandeur, la courbure de Berry, associée à la fonction d'onde qui décrit un électron dans une bande. Le Britannique Michael Berry a introduit cette notion en 1984 pour décrire certains phénomènes quantiques. Elle est mathématiquement analogue à un champ magnétique. Or, quand on intègre la courbure de Berry sur l'ensemble des électrons dans une bande complète, on obtient une quantité que le mathématicien sino-américain Shiing-Shen Chern avait étudiée dans les

années 1950. Cette quantité, le « nombre de Chern », est un invariant topologique qui ne peut prendre que des valeurs entières. Elle caractérise la topologie de la bande considérée, sa courbure globale et l'existence ou non d'un vortex dans l'espace réciproque.

Un gap est dit topologique lorsque le nombre de Chern total, obtenu par l'addition des nombres de Chern des bandes sous ce gap est non nul. Dans ce cas, il existe un niveau d'énergie autorisé dans le gap. Les électrons qui occupent cet état peuvent circuler dans le matériau. Mais

physiquement, cet état propagatif est localisé uniquement à la surface du matériau. On parle de correspondance volume-surface, car la topologie des bandes (définies par les électrons dans le volume du matériau) détermine l'existence et les propriétés des états de surface.

Autre particularité de ces états : la circulation du courant en surface est unidirectionnelle ; on obtient donc un transport non réciproque. Par ailleurs, ces états sont dits protégés topologiquement : comme cette conduction unidirectionnelle est une propriété topologique, et donc

THÉORIE DES BANDES ET TOPOLOGIE

D'après les règles de la physique quantique, dans un atome isolé, les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets. En revanche, dans le réseau cristallin d'un matériau, les valeurs possibles de l'énergie électronique s'étendent sur des intervalles continus, ou bandes, séparées par des intervalles

nommés bandes interdites, ou « gaps ».

Cette structure énergétique résulte du comportement ondulatoire des électrons. En raison de la périodicité du réseau cristallin, leurs ondes interfèrent et créent cette structure de bandes. Les électrons remplissent les bandes en obéissant à certaines règles. Ce sont des fermions, ce qui implique qu'il ne peut y avoir deux électrons dans le même état quantique. Ils remplissent donc les bandes d'énergies permises en commençant par les plus basses. Ce remplissage définit le niveau de Fermi, qui correspond à peu près au niveau de plus haute énergie occupé par un électron au zéro absolu (-273°C , ou 0 kelvin).

Si le niveau de Fermi

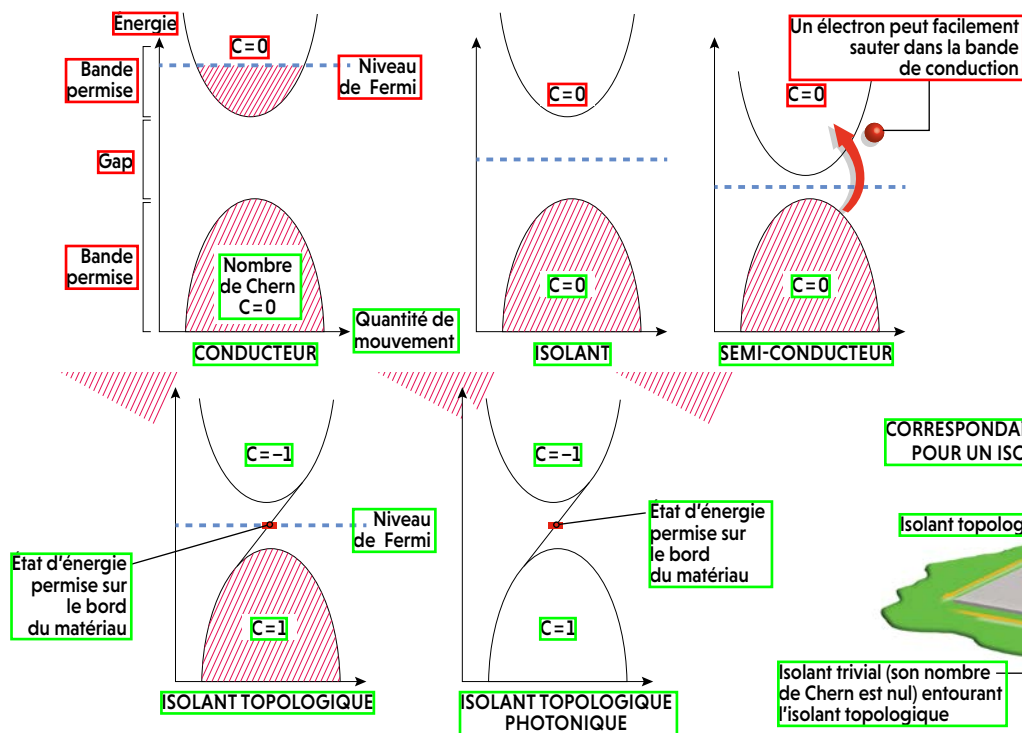
appartient à une bande permise, le matériau est conducteur, et caractérisé par un transport réciproque (pas de direction privilégiée du courant) : les électrons circulent facilement si l'on applique une tension électrique. Si le niveau de Fermi est dans une bande interdite assez large, le matériau est un isolant. Si le gap est étroit, il suffit d'apporter un peu d'énergie pour que l'électron passe dans la bande supérieure, la bande de conduction ; le matériau est alors semi-conducteur.

Dans les années 1980, les physiciens ont découvert que l'énergie des bandes n'est pas le seul critère à prendre en compte pour décrire les propriétés électroniques d'un matériau. Ils ont mis en évidence un paramètre pour

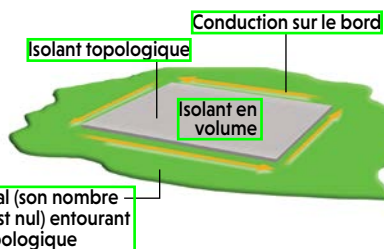
chaque bande : un invariant topologique nommé nombre de Chern qui, s'il est non nul, implique un comportement particulier du matériau, celui des isolants topologiques. Ainsi, si le niveau de Fermi est dans un gap et que les nombres de Chern sont non nuls, le matériau est isolant en volume. Mais un état d'énergie autorisé existe alors dans le gap sur le bord du matériau (à l'interface avec un isolant trivial comme l'air). On a donc un courant en surface qui est unidirectionnel et dont le sens dépend du signe de la somme des nombres de Chern des bandes situées sous le gap.

Dans un matériau

photonique, les photons étant des bosons, ils ne remplissent pas les bandes comme les électrons (il n'y a pas de niveau de Fermi). Cependant, dans certaines configurations, comme dans un cristal photonique, il est possible d'avoir un comportement d'isolant en volume car un photon ne peut pas se propager à l'énergie du gap dans le volume du matériau. Et les nombres de Chern peuvent être non nuls, ce qui peut conduire à l'existence d'un état de propagation unidirectionnelle sur la surface, à l'énergie du gap.



CORRESPONDANCE DANS L'ESPACE RÉEL POUR UN ISOLANT TOPOLOGIQUE



Isolant trivial (son nombre de Chern est nul) entourant l'isolant topologique

L'UBIQUITÉ DE LA TOPOLOGIE

En 2005, Duncan Haldane a montré que les principes de topologie qui s'appliquent aux systèmes électroniques et photoniques sont très généraux et sont généralisables à n'importe quel type d'ondes. Aujourd'hui, des physiciens utilisent des arguments topologiques pour interpréter, par exemple, le mouvement d'ondes géophysiques équatoriales. En 2017, une équipe de l'ESPCI, à Paris, et de l'EPFL, à Lausanne, a mis en évidence des effets topologiques en étudiant des ondes acoustiques se propageant dans des réseaux faits de canettes de Coca-Cola !

globale, le courant circule sans être perturbé par des fluctuations locales telles que des défauts ou des impuretés dans le réseau cristallin. C'est la même idée que dans le superfluide, où les perturbations responsables de la viscosité du fluide sont supprimées.

Grâce à la topologie et au nombre de Chern, il a été possible de développer une description mathématique rigoureuse de l'effet Hall quantique. Et grâce à cette approche, Duncan Haldane a montré qu'il était possible d'avoir des bandes avec une courbure globale non nulle sans que les électrons suivent des trajectoires circulaires fermées – ce qu'il a nommé l'effet Hall quantique anormal.

Ainsi, pour obtenir une description complète de la conductivité d'un solide, il faut étudier les bandes électroniques et leur remplissage, mais aussi leur nombre de Chern. Ce constat a suscité de nombreux développements théoriques et expérimentaux pour trouver de nouveaux isolants topologiques.

En 2005, Charles Kane et Eugene Mele, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, ont proposé un type d'isolant topologique qui ne se manifeste pas grâce à un champ magnétique externe comme dans l'effet Hall quantique, mais qui est fondé sur le couplage spin-orbite des électrons. Cette interaction relie le mouvement de l'électron à son spin (son moment magnétique intrinsèque, que l'on peut se représenter comme une flèche qui pointe vers le haut ou vers le bas). Du fait de ce couplage, l'électron dans un solide ressent une force similaire à celle qu'il subirait en présence d'un champ magnétique et dont la direction dépend de son spin.

On obtient ainsi des états de surface correspondant à deux courants de sens opposés, en fonction de l'orientation du spin. Ces courants de spin sont topologiquement protégés ; on parle alors d'effet Hall quantique de spin. Ce nouveau type d'isolant topologique est très intéressant, car il ne nécessite pas un champ magnétique externe et apparaît davantage comme une propriété intrinsèque au matériau. L'effet Hall quantique de spin a été observé très vite après sa prédiction et fait encore aujourd'hui l'objet d'intenses recherches.

ET LES PHOTONS ?

Ces derniers isolants topologiques sont la preuve qu'il est *a priori* possible d'avoir un transport non réciproque sans faire appel à un agent extérieur tel qu'un champ électrique ou magnétique. Il ne serait donc pas obligatoire d'utiliser des particules chargées, mais ces principes sont-ils pour autant transposables aux photons ? La réponse est oui.

Une première étape a été franchie en 1988 lorsque Eli Yablonovitch, de la société Bell Communications Research, et Sajeev John, de l'université de Princeton, ont inventé les

cristaux photoniques. Ces dispositifs reposent sur une modulation périodique de l'indice de réfraction au sein du matériau. Comme pour les électrons, l'interférence des ondes électromagnétiques avec ce milieu périodique conduit à une structure de bandes d'énergies permises et de bandes interdites. Autrement dit, les photons qui se propagent dans le cristal photonique ont une énergie compatible avec les bandes permises, mais ne peuvent pas accéder aux énergies des gaps.

Deuxième étape, en 2005, Duncan Haldane a encore généralisé la portée de la physique topologique en montrant que ses concepts s'appliquaient aussi aux systèmes photoniques, et plus généralement à n'importe quel type d'onde se propageant dans un milieu. Plus précisément, il a montré que les bandes d'énergies photoniques sont caractérisées par la même courbure globale que leurs homologues électroniques, ce qui a donné naissance à la photonique topologique.

Son article a mis trois ans à être publié, ce qui témoigne de la forte opposition à laquelle il a dû faire face à l'époque. Il y a en effet plusieurs différences essentielles entre les photons et les électrons. Même si des bandes d'énergie existent pour les photons dans un cristal photonique, le concept de remplissage des bandes, lié à la nature fermionique des électrons est absent. Parce qu'ils ont un spin $1/2$, demi-entier (ce qui en fait des fermions), les électrons obéissent au principe d'exclusion de Pauli selon lequel il ne peut y avoir deux électrons dans le même état quantique. Ils occupent donc différents niveaux d'énergie dans les bandes, ce qui permet de les remplir. Les photons, eux, sont des bosons (car ils ont un spin entier, égal à 1) et ne sont donc pas soumis au principe d'exclusion de Pauli. Ainsi, lorsqu'on parle d'isolant en photonique, on veut simplement dire qu'il existe un gap et que la propagation de la lumière dans le milieu est interdite aux énergies du gap.

Par ailleurs, les électrons sont chargés. Ils sont donc sensibles à un champ magnétique *via* la force de Lorentz. En appliquant un tel champ (externe ou par le couplage spin-orbite) à des électrons, leur évolution n'est plus symétrique si l'on inverse le sens d'écoulement du temps. Or, au niveau le plus fondamental, c'est la brisure de la symétrie temporelle (peu importe son origine) qui donne un nombre de Chern non nul.

Si une telle brisure de symétrie n'est pas évidente *a priori* pour les photons, il faut noter que l'onde électromagnétique associée aux photons présente une polarisation (linéaire, circulaire, etc.), qui caractérise la direction dans laquelle son champ électrique oscille au cours de sa propagation. Dans certains cas, il est possible d'associer à la polarisation une courbure de Berry non nulle (et donc un nombre de Chern non nul). Pour y parvenir, il faut utiliser des matériaux

DE LA TOPOLOGIE AUX NOMBRES DE CHERN

La topologie est la partie des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques globales de la géométrie des objets. Les invariants topologiques sont des nombres entiers ou demi-entiers correspondant à ces caractéristiques. Pour un solide en 3D, l'invariant le plus connu est le « genre », qui décrit le nombre de trous que présente sa surface. Le genre (une propriété globale de l'objet) est calculé à partir de l'intégrale de la courbure, définie localement en chaque point de la surface. Un ballon de rugby et un ballon de football sont géométriquement distincts, mais leur genre est le même et ils sont topologiquement équivalents. On peut déformer continûment l'un en l'autre sans créer de trous dans la surface. Pour des courbes, on peut définir le nombre d'enroulements (combien de fois cette courbe enlance

un objet), qui se calcule avec l'intégrale de l'angle polaire du point qui se déplace le long de la courbe. On constate que les invariants sont en général les intégrales des propriétés locales (courbure, angle polaire), et ces intégrales conservent uniquement les informations sur les propriétés globales des systèmes.

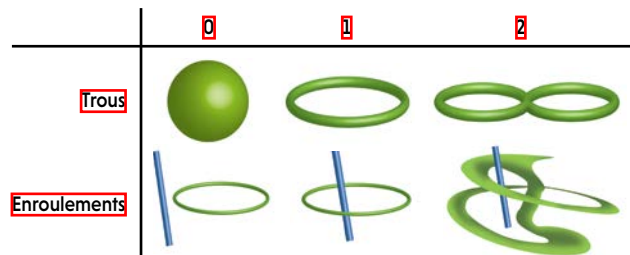
Le théorème de Gauss-Bonnet

est fondamental en topologie, car il relie de façon très générale les propriétés locales d'un objet à l'une de ses propriétés globales. Par exemple, l'intégrale, sur toute la surface Σ d'un objet, de sa courbure locale F (intégrée sur tous les éléments de surface dS) est reliée au genre ν (le nombre de trous de l'objet). Or si l'on déforme la surface de l'objet, le genre reste, lui, inchangé.

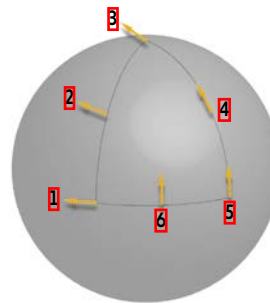
$$\frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma} F dS = 2(1-\nu)$$

En physique de la matière

condensée, les outils de la topologie ne s'appliquent pas à l'objet physique mais à la structure des bandes d'énergie accessibles aux particules mobiles dans ce matériau. On définit d'abord la courbure de Berry. Pour comprendre ce paramètre, une analogie est celui du transport parallèle d'un vecteur sur une surface



La topologie classe les objets selon le nombre de trous ou d'enroulements qu'ils exhibent, des propriétés invariantes lorsque l'objet est déformé de façon continue.



Dans le transport parallèle sur une sphère, on constate qu'un vecteur que l'on fait glisser de l'équateur (1), vers le pôle nord (3) puis de nouveau vers l'équateur (5) en passant par un autre méridien et en gardant le même angle avec chaque branche de son trajet, a subi une rotation en revenant au point de départ (6).

courbe. En évoluant sur un circuit fermé en respectant certaines contraintes sur son orientation, le vecteur final et le vecteur initial ne pointent pas dans la même direction. Le transport parallèle sur la surface courbe a induit l'apparition d'un angle entre les deux vecteurs (voir ci-dessus). De la même façon, on peut assimiler à un vecteur la fonction d'onde qui décrit un électron dans

une bande. On peut associer une courbure, la courbure de Berry, au changement d'orientation de ce vecteur lorsqu'un électron se déplace dans l'espace réciproque des impulsions. En intégrant cette courbure sur une bande complète, on applique le théorème de Gauss-Bonnet et on obtient un invariant topologique, le nombre de Chern, qui caractérise la topologie de la bande.

gyromagnétiques, qui ont la particularité d'avoir un indice optique différent pour les polarisations circulaires droite et gauche de la lumière.

Ainsi, dans un cristal photonique fait de matériaux gyromagnétiques, le gap photonique peut être associé à un nombre de Chern non nul. En 2009, le groupe de Marin Soljačić, au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) a confirmé expérimentalement cette prédiction théorique. Le problème est que les matériaux ayant une activité gyromagnétique fonctionnent typiquement dans le domaine fréquentiel des microondes, très loin des fréquences optiques qui sont celles généralement utilisées pour transporter l'information.

La piste des isolants topologiques liés à l'effet Hall quantique de spin a aussi été explorée. Ceux-ci ont l'avantage de fonctionner sans champ magnétique. Il faut cependant définir un équivalent du spin de l'électron pour le photon : comme la polarisation de la lumière peut toujours être décomposée en deux composantes linéaires (souvent nommées « horizontale » et

« verticale »), on obtient une description de l'onde électromagnétique comme un système à deux niveaux associés à un pseudo-spin.

En 2011, Mohammad Hafezi et ses collègues, de l'université du Maryland, aux États-Unis, se sont inspirés de cette idée de pseudo-spin pour proposer une autre solution. Ils ont construit un réseau photonique périodique constitué de résonateurs optiques circulaires (des guides d'onde où la lumière s'accumule par interférences constructives) dans du silicium. Chaque résonateur a deux états différents, selon le sens dans lequel circule la lumière, et que l'on identifie aux états d'un pseudo-spin. Le défaut de cette approche est que la protection topologique du sens de propagation n'est pas totale, car on n'a pas un vrai spin comme pour un électron. Pour ce dernier, la direction du spin, qui définit le sens de propagation, ne peut être inversée. Mais avec le pseudo-spin du photon, l'inversion reste possible.

D'autres importantes avancées sont fondées sur le potentiel des quasiparticules mixtes

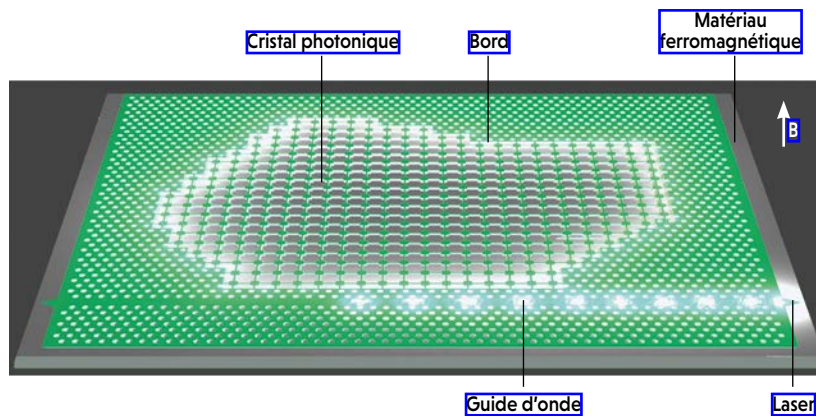
lumière-matière, les excitons-polaritons, dont nous avons déjà évoqué l'intérêt pour constituer un superfluide de lumière. Ici, en raison de leur partie électronique, ces quasi-particules ont une activité magnétique pour des ondes se propageant à des fréquences optiques.

Ainsi, en 2015, notre équipe a montré théoriquement qu'en plaçant ces excitons-polaritons dans un réseau périodique approprié, il était possible d'obtenir un analogue polaritonique de l'effet Hall quantique anormal. L'observation expérimentale de cet effet vient d'être rapportée par le groupe de Sven Höfling, de l'université de Würzburg, en Allemagne. Nous avons aussi montré qu'il était possible d'utiliser cet effet pour réaliser des micro-isolateurs photoniques fonctionnant à des longueurs d'onde optiques, ce qui est un prérequis indispensable à leur utilisation pratique. En garantissant un transport non réciproque, ces micro-isolateurs, placés en série après une diode laser, empêchent la lumière de revenir dans la diode et d'en perturber le fonctionnement. Nous sommes donc en passe de résoudre le problème de la photonique intégrée et de la question du transport non réciproque.

UN LASER INTÉGRÉ

La richesse du domaine nous permet d'aller plus loin encore, avec le développement des lasers topologiques. Notre équipe a proposé cette idée en 2016: l'effet laser se développerait directement dans un état topologiquement protégé, ce qui permet d'intégrer dans le même composant le laser et l'isolateur. Dès 2017, le groupe de Jacqueline Bloch, au C2N (le Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau, près de Paris), a concrétisé cette idée dans des réseaux à une dimension. La même année, Boubacar Kanté, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont fait état d'un laser topologique bidimensionnel, fondé sur l'effet Hall quantique anormal (voir l'image ci-dessus).

Cette démonstration résulte d'un tour de force technique, à savoir obtenir un effet magnétique pour des modes photoniques aux fréquences «télécoms» proches de l'optique. En effet, les semi-conducteurs ont normalement une faible réponse magnétique dans ce domaine de longueurs d'onde. L'équipe de Boubacar Kanté a combiné son réseau bidimensionnel avec un matériau ferromagnétique qui amplifie l'effet d'un champ magnétique appliqué, en permettant aux électrons du semi-conducteur de ressentir une intensité de champ d'une quinzaine de teslas. Ce champ magnétique a permis la formation d'un gap topologique, et l'existence d'un état de bord unidirectionnel autour du cristal photonique. Ce dispositif s'est aussi comporté comme une cavité où l'effet laser s'est développé. Une partie de la lumière était ensuite



En 2017, Boubacar Kanté et son équipe ont mis au point un laser topologique. Sur un matériau ferromagnétique qui amplifie un champ magnétique B , les chercheurs ont gravé un cristal photonique dans un matériau semi-conducteur au bord duquel se développe un mode photonique unidirectionnel. Ce système forme une cavité où l'émission stimulée du laser se développe. Un guide d'onde placé à proximité permet d'extraire la lumière.

extraite en couplant le dispositif à un guide d'onde. Grâce au caractère unidirectionnel du mode topologique du dispositif, une onde rétro-diffusée dans le guide d'onde ne pénètre pas dans la cavité laser. Le dispositif se comporte donc comme un laser suivi d'un isolateur, les deux intégrés dans la même structure.

En 2018, Mordechai Segev, du Technion, en Israël, et ses collègues ont développé un autre type de laser topologique, cette fois fondé sur un analogue de l'effet Hall quantique de spin et l'utilisation d'un réseau de résonateurs couplés similaire à celui considéré par Mohammad Hafezi (voir l'image page 65). Il n'y a cette fois pas besoin de champ magnétique externe, mais il n'y a pas non plus d'unidirectionnalité (puisque l'on a seulement des pseudo-spins et non des spins comme pour les électrons). L'amplification laser se développe dans les deux composantes de spins se propageant chacune dans une direction opposée.

Récemment, notre équipe a proposé de combiner la notion de superfluide et de topologie des bandes d'énergie pour obtenir un nouvel analogue de l'effet Hall quantique de spin. Dans ce cas, le rôle du spin est assuré par le sens de l'enroulement des vortex du superfluide de lumière. Cette quantité étant elle-même topologiquement protégée, la conservation du spin est garantie et le caractère non réciproque du transport topologique est entièrement restauré. Il reste à mettre en œuvre cette idée.

Les développements de ces dernières années sont impressionnants. Grâce à la topologie, nous sommes en mesure d'imaginer une grande variété de solutions théoriques à la question du transport non réciproque, dont certaines ont été réalisées expérimentalement. Ces résultats sont encourageants et l'intérêt de ces systèmes est incontestable. Le développement de micro-isolateurs optiques et leur intégration semblent un objectif à portée de main, ce qui ouvrira la voie aux circuits intégrés optiques de demain. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Bahari et al., Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries, Science, vol. 358, pp. 636-640, 2017.

P. St-Jean et al., Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice, Nature Photonics, vol. 11, pp. 651-656, 2017.

D. Solnyshkov et al., Kibble-Zurek mechanism in topologically nontrivial zigzag chains of polariton micropillars, Phys. Rev. Lett., vol. 116, 046402, 2016.

A. V. Nalitov et al., Polariton Z topological insulator, Phys. Rev. Lett., vol. 114, 116401, 2015.

F. D. M. Haldane et S. Raghu, Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry, Phys. Rev. Lett., vol. 100, 013904, 2008.

F. D. M. Haldane, Model for a quantum Hall effect without Landau levels, Phys. Rev. Lett., vol. 61, pp. 2015-2018, 1988.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

JEAN-PAUL MOATTI

est président-directeur général de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et président de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (Allenvi). Il est l'un des quinze experts nommés par l'ONU pour rédiger le rapport 2019 sur les Objectifs de développement durable (ODD) fixés pour 2030.

La science doit jouer son rôle pour garantir un monde durable



RD-Studio Cabrelli

En 2015, l'Organisation des Nations unies (ONU) a fixé des objectifs de développement durable (ODD). Quatre ans plus tard où en est-on ?

La situation est loin d'être satisfaisante. Les 17 objectifs définis en 2015 ont été déclinés en 169 cibles et un nombre très limité d'entre elles sont en voie d'être atteintes en 2030 ! Il s'agit, par exemple, de la baisse de la mortalité infantile, de l'accès à l'éducation primaire y compris pour les filles et de la réduction de l'extrême pauvreté. Mais même pour ces objectifs-là, il est difficile de crier victoire. D'abord parce que ces indicateurs sont obtenus en extrapolant linéairement la tendance actuelle, ce qui est une hypothèse discutable. Ensuite, parce que ces indicateurs reflètent des moyennes mondiales et masquent les grandes disparités réelles. Plus de la moitié de l'extrême pauvreté (personnes vivant avec moins de 1,9 dollar par jour) se concentre par exemple dans cinq pays, en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud.

Sur la réduction de la pauvreté, vous appelez à une grande vigilance, pourquoi ?

Entre 2000 et 2017, un milliard de personnes sont sorties de l'extrême pauvreté. C'est bien sûr une bonne nouvelle. Néanmoins, la littérature scientifique montre que ce résultat est fragile, d'abord parce que sur la même période le nombre de personnes vivant entre 2 et 3 dollars par jour a lui augmenté de un milliard et que ces individus demeurent vulnérables aux crises économiques

ou écologiques et aux situations de conflit. Ensuite parce que la pertinence de ce seuil monétaire est très discutée car il ignore le caractère multidimensionnel de la pauvreté.

L'autre motif d'inquiétude est l'accroissement sans précédent des inégalités. Les 1 % les plus riches de la planète détenaient 25 à 30 % de la richesse mondiale en 1980, pour 40 % en 2016, alors que les 75 % les plus pauvres stagnaient autour de 10 % seulement du total. Il faut aussi en finir avec l'idée fausse selon laquelle, pour éliminer la pauvreté, il suffit d'augmenter la croissance quitte à creuser les inégalités. Soit-disant parce que par un effet de ruissellement, la richesse amassée par les plus riches finirait par profiter



► aussi aux plus pauvres. Les données le démontrent. Depuis les années 1980, les 1 % les plus riches captent 27 % de la croissance des revenus, tandis que les 50 % les plus pauvres en perçoivent 12 % ! Ce que montrent les analyses aujourd'hui c'est qu'il est possible de concilier la lutte contre la pauvreté et les inégalités, l'amélioration du bien-être social avec la protection des écosystèmes planétaires. Et que la défense des modèles actuels par les plus riches pour conserver leur position est une entrave inquiétante au développement durable pour tous.

Quid des autres objectifs ciblés ?

Pour toute une part d'entre eux, nous ne sommes pas du tout sur la bonne voie. Mais plus inquiétant encore, comme pour les inégalités, nous allons dans le mauvais sens dans plusieurs domaines clés : les émissions de gaz à effet de serre, l'empreinte écologique de nos modes de production, la chute de la biodiversité qui s'est accélérée entre 2015 et 2019. C'est très préoccupant car si on ne tient pas ces objectifs-là, les autres seront vains. Si certaines régions deviennent totalement inhabitables à cause du réchauffement climatique, envoyer les filles à l'école ou garantir à tous l'accès à Internet à un coût abordable ne seront plus des sujets ! Tant que l'on poursuivra avec un modèle qui ne tient pas compte de son coût environnemental on ira dans la mauvaise direction ; le groupe d'experts indépendant en charge de rédiger le rapport d'évaluation des ODD lance un cri d'alarme et un appel à la prise de conscience de l'urgence d'agir. Cela concerne d'abord les gouvernements, mais passe aussi par une réorientation massive des investissements du secteur privé vers le développement durable ainsi que par une mobilisation de la société civile.

Malgré le côté alarmant de la situation, vous parlez d'une opportunité historique. Pourquoi ?

En 2015, les négociations qui ont abouti aux ODD ont bénéficié d'une conjoncture historique particulière. Deux facteurs ont joué en faveur de compromis intéressants. Premièrement, dans le climat de post-crise économique mondiale, beaucoup de pays à revenus intermédiaires, comme la Colombie, le Costa Rica, l'Afrique du Sud, ne voulant pas être en reste, se sont emparés des négociations. Deuxièmement, ces négociations n'ont pas été le seul fait des gouvernements. La société civile et le secteur privé en ont été des acteurs importants. Tout comme les scientifiques, rompus à ce type d'exercice depuis le sommet de Rio de 1992 et les conférences successives sur le climat et la biodiversité. Aujourd'hui, vu le contexte politique, le monde de la recherche n'arriverait plus à se faire entendre. Et des cibles comme la couverture maladie universelle ou même la lutte contre le réchauffement climatique auraient plus de mal à recueillir un consensus multilatéral.



UNE « BOÎTE NOIRE » CONTRE LA MORTALITÉ MATERNELLE

« Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge » est l'un des 17 objectifs de développement durable de l'ONU. Pour réduire la mortalité maternelle dans les pays en développement de l'Afrique de l'Ouest, où 1 femme sur 100 meurt en couches à l'hôpital, Alexandre Dumont, épidémiologiste, directeur de recherche IRD, et son équipe ont développé un outil innovant. S'inspirant d'une approche ayant fait ses preuves dans la sécurité du transport aérien pour tirer les leçons des accidents, ils ont mis au point une méthode d'audit systématique de chaque décès pour en comprendre les causes, détecter les failles et les erreurs. L'idée est de

décrypter cette « boîte noire » afin d'améliorer les soins et l'organisation des services obstétricaux. En testant cette approche dans 46 maternités sénégalaises et maliennes, soit un suivi de 190 000 cas en 4 ans, ils ont constaté une réduction de 15 % de la mortalité, allant même jusqu'à 35 % dans certains petits hôpitaux. Les chercheurs montrent aussi que ces audits qui remettent l'humain au centre du dispositif sont bien acceptés, faciles à utiliser, abordables et transposables à différents contextes. Preuve que les avancées en matière de lutte contre la mortalité ne passent pas toujours par de nouveaux traitements de pointe ou d'outils de diagnostic révolutionnaires.



© IRD - V. Briand

Quel est aujourd'hui le rôle de la science pour atteindre ces objectifs ?

Le rôle de la science est crucial : elle est indispensable pour guider les scénarios à mettre en place. On le voit bien sur des sujets complexes comme la sortie des pesticides. Il faut des recherches à un niveau fondamental pour trouver des moyens de production plus sains, que ce soit en biologie ou en agroécologie, mais aussi sur les pratiques et sur le modèle global d'agriculture. Il ne s'agit pas de remplacer un modèle par un autre qui se révélerait peu vertueux. La science doit aider à maximiser les bénéfices visés et à éviter les effets pervers. Pour autant, que mon message soit clair, nous avons aujourd'hui les connaissances scientifiques et technologiques suffisantes pour atteindre potentiellement de nombreuses cibles en 2030. Il faut s'en





donner les moyens. Selon les estimations à peu près consensuelles, pour aider les pays du Sud à se placer sur une trajectoire de développement durable, il faudrait 2,5 trillions – mille milliards – de dollars par an. C'est un peu plus de 10 % de l'investissement annuel mondial économique et financier qui est autour de 23 trillions de dollars et moins de la moitié de l'impact total, direct et indirect, des subventions aux combustibles fossiles. L'enjeu est donc d'orienter des moyens publics et privés suffisants vers le développement durable!

Pouvez-vous nous donner un exemple concret?

Prenons celui de la surpêche et de la surexploitation des écosystèmes marins. Il y a quelques années, les aires marines protégées (l'équivalent des parcs nationaux en mer) passaient encore pour des projets écologiques idéologiques. Aujourd'hui, les scientifiques sont unanimes : à condition d'être bien gérées avec les bons niveaux de réglementation, elles sont vraiment le moyen d'assurer la bonne santé des écosystèmes marins tout en continuant à procurer des services aux humains.

Mais cela ne fonctionne que si les pêcheurs sont impliqués en amont et ne se retrouvent pas sans revenus. Si les pêcheurs ne survivent pas, on rate l'objectif! La science est indispensable pour définir le temps et les moyens nécessaires au dispositif afin d'atteindre les bénéfices écologiques et économiques visés.

Est-ce cela la Sustainability science?

Oui, ce champ scientifique a émergé en lien avec les réflexions sur le développement durable et la nécessité de partir des problèmes posés et non plus des seules questions disciplinaires, pour proposer des solutions et anticiper les arbitrages difficiles et complexes qu'impliquent les ODD. La *Sustainability science*, la science de la durabilité, est montée en puissance au tournant des années 2000, au moment où la globalisation s'est heurtée au problème des limites des ressources planétaires. On pourrait la définir comme la science des interactions entre environnement et société qui recherche les moyens de créer un équilibre durable entre santé planétaire et bien-être humain. Comme elle s'attache à comprendre toute la chaîne causale des phénomènes écologiques et sociaux qu'elle étudie, elle doit intégrer les effets clés à toutes les échelles, du local au global, et est donc par nature interdisciplinaire. Elle a aussi une autre caractéristique, celle d'inciter les scientifiques à travailler avec les communautés impliquées et à élaborer des solutions pour et avec tous les acteurs sur le terrain (*lire les encadrés*).

En 1999, l'Académie des sciences américaine a fait de la *Sustainability science* une priorité, ainsi que l'Académie chinoise, en 2009. Depuis, la production scientifique consacrée à ce domaine ne cesse de croître de façon exponentielle.

Beaucoup d'objectifs paraissent antagonistes. En quoi la Sustainability science peut-elle aider à résoudre ces contradictions?

Tous les objectifs sont potentiellement contradictoires et ils sont tous potentiellement synergiques! Si on travaille seulement objectif par objectif, on risque d'en améliorer un au détriment de l'autre. Une étude publiée récemment dans *Nature Sustainability* montrait par exemple comment, si on n'y prend garde, des politiques mal conçues d'atténuation des émissions de CO₂ pourraient augmenter le nombre de personnes souffrant de faim, via des effets sur l'usage des terres. C'est d'ailleurs sur ces interdépendances des différents objectifs que la littérature spécialisée s'est concentrée ces cinq dernières années. C'est aussi sur le terrain à l'échelle locale qu'on peut lever les contradictions, d'où la nécessité des collaborations avec des scientifiques des pays impliqués, notamment dans la zone intertropicale et méditerranéenne comme nous le faisons par essence à l'IRD : plus de 60 % de nos publications sont cosignées par des partenaires des pays du Sud. ■

LA NOUVELLE DONNE DU QUINOA BOLIVIEN

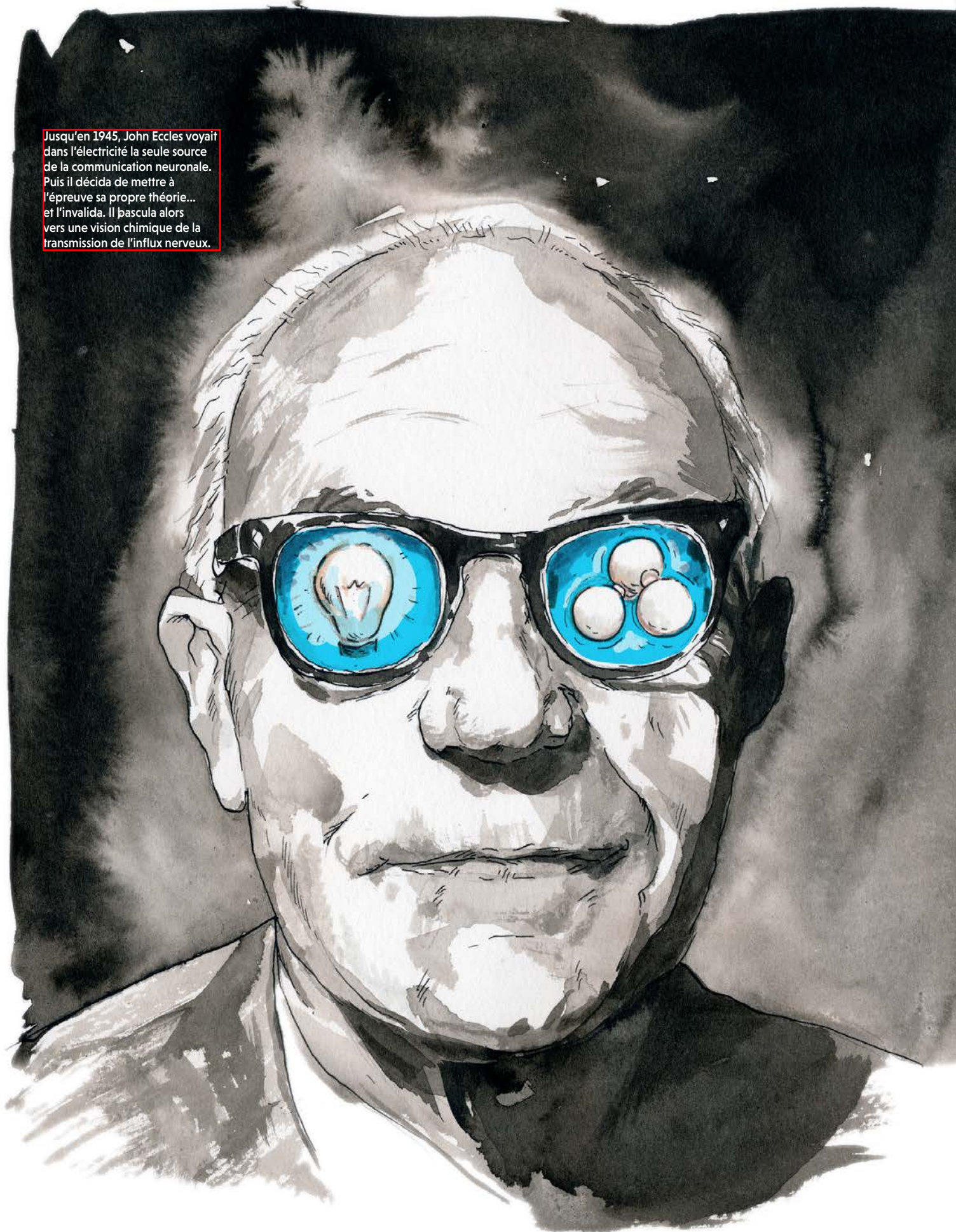
L'engouement planétaire pour le quinoa et ses répercussions sur les communautés rurales pauvres du sud de la Bolivie sont un cas exemplaire des transformations de pratiques ancestrales locales qui accompagnent la globalisation. Saines, bio, équitables, en 40 ans, les « grains des Incas » ont vu leur consommation exploser à l'échelle mondiale. Entre 2012 et 2014, les exportations vers les États-Unis et l'Europe ont augmenté de 260 % et le prix de la tonne a atteint les 9000 dollars. Une aubaine économique pour les familles qui cultivent le quinoa dans les

conditions extrêmes des hauts plateaux andins arides et froids. Un risque aussi : celui de déstabiliser tout leur système agricole, écologique et social. Comment gérer un tel changement d'échelle et de mode de production tout en conciliant durabilité et justice sociale? Le projet de recherche immersive coordonné par Thierry Winkel, agroécologue à l'IRD, et coconstruit avec ces communautés rurales, avait pour but de les aider à élaborer elles-mêmes des solutions pérennes. Durant 3 ans, chercheurs et producteurs ont analysé et anticipé ensemble et sur le terrain les scénarios possibles. Ces communautés ont alors choisi de rénover les normes d'usage de leur bien commun – les terres – afin de protéger la ressource, garantir un accès juste pour tous et répondre ainsi aux critères internationaux du commerce équitable. Selon ces travaux, c'est la cohésion sociale, l'autonomie de la gouvernance et la tradition de mobilité qui, comme dans d'autres régions arides dans le monde, confèrent à ces communautés leur capacité d'adaptation.



© RD - J-H. Roffé / IRD

Jusqu'en 1945, John Eccles voyait dans l'électricité la seule source de la communication neuronale. Puis il décida de mettre à l'épreuve sa propre théorie... et l'invalida. Il bascula alors vers une vision chimique de la transmission de l'influx nerveux.



L'ESSENTIEL

> John Eccles, le chercheur qui a montré que les neurones communiquent par des substances chimiques, avait commencé par combattre ardemment cette théorie.

> Son revirement doit beaucoup à sa rencontre avec Karl Popper, le philosophe qui avait établi qu'une théorie doit être réfutable pour être scientifique.

> Cet épisode marquant de l'histoire des sciences montre que, pour atteindre la vérité, nous devons critiquer nos propres opinions.

L'AUTEUR



JEAN-GAËL BARBARA
chercheur en histoire des neurosciences au CNRS, au laboratoire Neurosciences Paris-Seine et Sorbonne-Paris-Cité – laboratoire Sciences, philosophie, histoire

La volte-face du professeur Eccles

Pendant vingt ans, le neurophysiologiste australien John Eccles a défendu l'idée que les neurones communiquent par des courants électriques. Puis, soudainement, il invalida sa propre théorie et prouva que la communication est chimique. Un modèle de pensée autocritique...

Quoi de plus difficile que de reconnaître que l'on a tort? Pire: comment parvenir à adopter le point de vue de ses adversaires en attaquant ses propres positions? C'est pourtant de cette façon qu'a eu lieu une des découvertes les plus fondamentales des neurosciences: le fait que les connexions entre neurones (les synapses) fonctionnent avec des molécules chimiques et pas seulement avec des signaux électriques.

La nouvelle fait l'effet d'un coup de tonnerre. Lors de la réunion de la Physiological Society de Londres en 1951, l'éminent neurophysiologiste australien John Eccles renie publiquement sa propre théorie sur le fonctionnement des synapses. Une théorie qui stipule que nos

neurones sont censés communiquer entre eux par des phénomènes électriques directs au niveau des synapses. Sous les yeux de l'assistance médusée, lui, le plus ardent défenseur de cette théorie, l'adversaire déclaré de tous ceux qui soutenaient un mécanisme chimique de neurotransmission, reconnaît que ce sont eux qui avaient raison.

Évidemment, en annonçant publiquement son revirement, Eccles passe pour un fou qui décrédibilise l'ensemble de son œuvre. On pense à Galilée reniant sa thèse selon laquelle la Terre tourne autour du Soleil – mais c'est pire que cela, car c'est sous la contrainte que le savant florentin avait reconnu les égarements de sa doctrine, agenouillé devant les cardinaux inquisiteurs de son tribunal ecclésiastique. En ce sens, l'abjuration de la théorie électrique qu'Eccles semble s'infliger librement est

▢ d'autant plus incompréhensible, vu la véhémence et l'efficacité de ses attaques de jadis contre la théorie chimique, défendue alors par son éminent rival, sir Henry Dale.

Henry Dale avait déjà démontré que certains neurones (ceux qui relient la moelle épinière aux muscles, et ceux présents dans les ganglions nerveux) communiquaient par des substances chimiques. Eccles s'était efforcé de prouver que, si ce mécanisme était envisageable au niveau des muscles et des ganglions, ce ne saurait être le cas à l'intérieur du cerveau. Il avait échafaudé pour cela, dès les années 1930, une théorie selon laquelle les neurones dans le cerveau communiquent comme de purs conducteurs électriques, le courant passant de l'un à l'autre sans intervention de neuromédiateurs au niveau des synapses. Son argument ? La transmission neuronale se produit avec une telle rapidité qu'il ne peut s'agir que d'un phénomène électrique. Il a d'ailleurs mesuré cette vitesse grâce aux nouveaux oscillographes cathodiques dont il dispose à partir de 1935.

UN BRETTEUR VIRULENT ET OBSTINÉ, MAIS PAS OBTUS

Dans ses manœuvres pour décrédibiliser ses adversaires, Eccles ne ménage ni ses efforts ni sa hargne. C'est un bretteur, un intellectuel passionné de philosophie des sciences, de joutes verbales aussi bien que sportives – il invite souvent ses hôtes à disputer une partie de tennis sur le court privé de sa propriété. Dans son milieu, on connaît son caractère difficile, voire entêté, prompt à croiser le fer dans les débats scientifiques, se faisant volontiers l'avocat du diable.

Alors qu'est-ce qui a bien pu l'amener à changer d'avis ? Deux choses. D'abord, Eccles était certes virulent et obstiné, mais pas obtus. Il était aussi connu pour sa hargne que pour une étonnante capacité à adopter brusquement, après avoir cherché à déstabiliser un adversaire, le point de vue de ce même adversaire. Ensuite, il y a son histoire. Une histoire qui porte la marque d'un long cheminement et qui l'amènera à conceptualiser la notion d'autocritique appliquée à ses théories.

Eccles a tout d'abord cru à la théorie de la neurotransmission électrique pour des raisons philosophiques et expérimentales. Il a été un des derniers élèves d'un des grands noms de la recherche en neurosciences, sir Charles Sherrington au Magdalen College d'Oxford. Un scientifique renommé, chef de file de l'école de neurophysiologie britannique d'Oxford et Prix Nobel de médecine en 1932, auquel Eccles a voué une admiration sans bornes, allant jusqu'à déclarer qu'il était la seule personne au monde dont il pouvait accepter d'être l'élève, tant sa dimension intellectuelle et sa vision personnelle des rapports entre le corps et l'esprit lui correspondaient.

John Eccles (1903-1997)
photographié en 1963
dans son laboratoire.
C'est cette année-là qu'il reçut
le prix Nobel de physiologie
ou médecine, partagé avec Alan
Hodgkin et Andrew Huxley.



Eccles cherchait à ridiculiser ses adversaires. Et puis un jour, il adopta leur point de vue

Or Sherrington a toujours favorisé une théorie électrique de la neurotransmission, lui-même en partie pour des raisons philosophiques : il avait une vision dualiste de l'esprit et du corps, considérant que la composante immatérielle de l'esprit est d'une nature essentiellement distincte du corps. L'esprit interagit si rapidement avec le cerveau qu'il doit le faire par des processus électriques.

Comment s'étonner qu'Eccles adopta cette même vision ? Sous sa direction, il commença par étudier, dans les années 1930, la transmission synaptique dans les ganglions nerveux, puis dans la moelle épinière. Les deux hommes étaient alors en concurrence directe avec l'école de neurophysiologie américaine, qui avait commencé à prendre le pas sur l'école

d'Oxford au cours des années 1920 grâce à une avancée technique considérable. Et les résultats obtenus par Eccles, tout comme ceux de ses adversaires neurophysiologistes américains, étaient en faveur de la neurotransmission électrique. Comment, alors, imaginer un autre scénario?

RENCONTRE CAPITALE AVEC KARL POPPER

L'histoire est faite d'imprévus et se nourrit autant de sciences et d'idées que d'argent, de politique et de mariages. En 1937, Eccles prend la décision de retourner en Australie, pour deux raisons. D'abord, il peine à obtenir des crédits de recherche; ensuite, il estime que les Alliés tardent à faire front contre la montée du nazisme. De là il s'installe en Nouvelle-Zélande, en 1943, suivant le conseil de son épouse néo-zélandaise. Il poursuit alors ses recherches sur les potentiels synaptiques dans la moelle épinière à l'université de Dunedin, en Nouvelle-Zélande. Et, là encore, il acquiert une belle notoriété en défendant la théorie électrique. Pour l'instant, tout porte encore à croire que cette théorie ne fera que s'affermir. Mais c'est compter sans une rencontre décisive.

L'un de ses collègues, Steve Kuffler, émigré hongrois, introduit Eccles dans les cercles de réfugiés d'Europe en Australie, puis en Nouvelle-Zélande. Parmi ceux-ci, un philosophe viennois d'ascendance juive, Karl Popper. Popper est philosophe des sciences. Selon lui, aucune théorie scientifique ne peut être tenue pour vraie une fois pour toutes parce qu'elle aurait été vérifiée par des expériences. Une théorie n'est scientifique que si elle prend la forme d'un énoncé qui peut être non pas vérifié, mais réfuté...

Eccles, en quête de critères pour trancher la polémique sur la nature de la neurotransmission, est sensible à cette vision. Il invite Popper en 1945 à donner une série de conférences dans sa faculté. Puis, suivant sa méthode, il s'attache dès lors à présenter ses idées théoriques de manière à ce qu'elles semblent résister aux procédures expérimentales classiques de réfutation. Il propose notamment une théorie chimique faisant intervenir des ions chlorure – théorie réfutable expérimentalement, car il est possible de remplacer les ions chlorure par d'autres ions et d'observer si la transmission de l'influx est modifiée ou non.

Or au sein même de son laboratoire, Kuffler et son jeune collègue Bernard Katz mènent des

L'expérience décisive menée par Eccles se déroula le 20 août 1951. L'accouchement ce même jour de l'épouse de Jack Coombs, l'un des collègues d'Eccles, la retarda quelque peu.



Des recherches visant à tester directement la théorie chimique de la neurotransmission à la jonction neuromusculaire (où les neurones moteurs de la moelle épinière sont reliés aux fibres musculaires dont ils commandent les contractions). Kuffler et Katz testent le rôle de molécules dans la transmission de cet influx nerveux, et ils utilisent pour cela une technique proche de celle de l'ennemi juré, Dale. Et voilà qu'à la surprise générale, à force de vouloir contredire la théorie de la maison, ils y arrivent ! Stupeur : leurs résultats sont en accord avec la théorie chimique.

QUAND UNE THÉORIE S'EFFONDRE

Eccles ne peut plus faire machine arrière, puisqu'il a lui-même formulé ses propres idées de façon à ce qu'elles soient réfutables. Il accepte donc cette réfutation de la théorie électrique. Du moins pour la neurotransmission musculaire. Mais pour le fonctionnement des neurones du cerveau, il campe sur sa position du « tout-électrique ». Il croit pouvoir respirer, car il est pour l'instant impossible de mettre en œuvre à l'intérieur du cerveau les méthodes de mesure pharmacologiques utilisées par Kuffler et Katz, du fait qu'on ne connaît pas encore les neurotransmetteurs des neurones cérébraux. Mais cela ne suffira pas à le préserver du mouvement qui est en marche, car une innovation technique va mettre à bas son édifice.

Depuis 1950 s'est engagée une course internationale afin de tester la théorie chimique. Une nouvelle méthode a vu le jour : enregistrer les variations de potentiel électrique des neurones de part et d'autre de leur membrane au moyen d'une fine microélectrode de verre. Implantée dans le neurone, cette électrode possède un orifice d'un diamètre d'un demi-micromètre et permet de mesurer la valeur exacte du potentiel électrique interne du neurone en se faisant une idée des échanges d'ions impliqués.

La course qui s'est engagée dans le monde pour savoir qui sera le premier à réaliser de tels enregistrements s'apparente, par l'ampleur des révolutions neuroscientifiques qu'elle suscitera ultérieurement, à la « course à l'espace » qui s'engage entre les États-Unis et l'URSS à partir de 1957. Entre ces deux courses, il y a certes une différence d'échelle. Mais en biologie, comme Eccles le soulignera plus tard, il n'y a pas encore de *big science*, une science organisée à l'échelle internationale par la coopération de grandes institutions, et tout se fait encore à l'échelle de petits laboratoires, avec des recherches dont les conséquences ne sont cependant pas moins importantes pour l'humanité.

Eccles s'engage dans cette course d'une façon qui lui ressemble : il propose à un de ses adversaires de venir travailler dans son laboratoire... Cet Archibald McIntyre construit alors un dispositif pour enregistrer des neurones à

l'aide de microélectrodes en verre. Eccles met un peu de temps à comprendre tout l'intérêt de cette technique, mais il finit par se dire que s'il arrivait à enregistrer la différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur d'un neurone, par exemple un motoneurone de la moelle épinière d'un chat, il serait à même de réfuter l'une des théories de la neurotransmission en enregistrant le signe de la déflexion du potentiel lors d'un phénomène d'inhibition.

Dès qu'il comprend cela, et avec son goût de la compétition, Eccles veut à tout prix participer à cette course. Lui que l'on surnomme à Dunedin « Synaptic Jack », le spécialiste mondial des synapses, ou encore « The Great White God » en raison de sa puissance et de son ardeur au

CES SCIENTIFIQUES QUI SE CRITIQUAIENT EUX-MÊMES

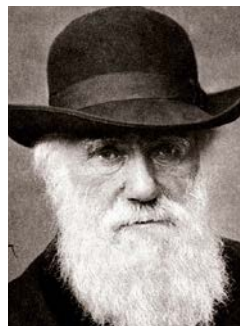
Un des exemples les plus célèbres de pensée qui lutte contre elle-même pour s'approcher de la vérité est celle de Charles Darwin. Dans sa construction de la théorie de l'évolution, le célèbre naturaliste confia l'inconfort que lui causait sa propre découverte, car elle remettait en cause l'idée de la création biblique. Fils de pasteur, marié à une fervente pratiquante, Darwin expliqua avoir tenté de trouver des failles dans sa propre théorie, mais avoir finalement dû y renoncer et accepter le verdict de l'observation et de la raison.

Un autre grand esprit et grand nom de la science, Louis Pasteur, invitait ses collaborateurs à défier ses vues en cherchant des preuves expérimentales contraires aux

siennes. Toujours au cours de ces mêmes années, le physiologiste Claude Bernard, considéré comme le père de la médecine expérimentale, était marqué quant à lui par une forme d'indifférence à la pérennité des théories scientifiques. Il rappelle en cela la philosophie de Karl Popper, pour qui aucune théorie scientifique digne de ce nom n'est définitive. Son caractère scientifique se reconnaît même au fait qu'elle est formulée de façon à pouvoir être invalidée – et donc éventuellement remplacée par une autre.

Ce principe de pensée est à l'opposé de la croyance, qui admet une vérité comme définitive et n'envisage pas de la remettre en question selon les éléments d'observations ou d'argumentation contraires. La démarche mentale d'autoréfutation est donc le fruit d'une véritable discipline et d'un apprentissage, dont dépend – l'histoire des sciences nous le montre – le progrès des idées et des techniques dans une société. Une leçon à méditer, à l'ère d'Internet où l'on peut facilement croire à toutes sortes de théories, notamment conspirationnistes, sans avoir le réflexe de les passer au crible de l'esprit critique.

J.-G. B.



Pasteur et Darwin sont deux exemples de génies scientifiques qui cultivait l'esprit d'autocritique. Le premier en demandant à ses élèves de trouver des preuves contre sa théorie, le second en les cherchant lui-même...

Eccles monta une expérience qui lui donna tort, puis attendit le bon moment pour annoncer ses résultats

travail, ne peut manquer une telle occasion de se mettre en valeur. Il requiert l'aide de deux collègues: Jack Coombs, chargé de construire un nouvel appareil de stimulation ainsi qu'une unité électronique d'enregistrement, et Lawrence Brock, qui fabriquera des électrodes ultrafines en étirant des tubes de verre sous une loupe binoculaire avant de remplir les micro-électrodes d'une solution de chlorure de potassium concentrée, jusqu'à la pointe. Un travail de fourmi, pour un enjeu colossal.

UN ACCOUCHEMENT DIFFICILE

L'expérience décisive a lieu le 20 août 1951. L'équipe est affairée autour d'un chat anesthésié. Eccles est sur le point de faire des essais pour introduire une microélectrode dans un motoneurone du chat. Ce neurone présente des synapses formées avec d'autres neurones – excitateurs ou inhibiteurs – de la moelle épinière de l'animal. L'expérience consiste à mesurer les potentiels électriques qui apparaissent dans le neurone quand les neurones inhibiteurs reliés par des synapses sont activés au moyen d'une autre électrode de stimulation. Et de ce résultat dépend le verdict final de l'expérience.

En effet, rappelons les deux hypothèses qui s'affrontent. D'un côté, la théorie électrique prédit que la synapse est purement électrique et que, par conséquent, l'inhibition se manifeste par l'annulation du potentiel électrique du neurone enregistré au niveau des synapses. À cette vision s'oppose l'hypothèse chimique, selon laquelle le potentiel électrique du second neurone pourrait basculer dans les valeurs négatives car des messagers chimiques provoqueraient l'ouverture de petits pores dans le neurone (des canaux ioniques), ce qui se traduirait par une entrée d'ions chlorure dans le neurone et une accumulation de charges électriques négatives. Le dispositif expérimental est prêt. Qu'est-ce qui peut encore l'arrêter?

Eh bien... La femme de Coombs est sur le point d'accoucher.

La nouvelle provient du domicile du chercheur lui-même. Abandonnant leurs instruments, Coombs et Eccles se précipitent dans leur voiture, pendant que Brock veille sur le chat. Après l'accouchement, la mère et l'enfant sont laissés aux soins d'un médecin, et les essais peuvent enfin commencer.

LA VÉRITÉ PAR LA CONTRADICTION

Rapidement, Eccles et ses collègues obtiennent un enregistrement exploitable. Sous leurs yeux, la trace de potentiel du neurone enregistré subit une inflexion vers le bas. C'est ce qu'on appelle une hyperpolarisation, qui signifie que le potentiel électrique a basculé dans le négatif, récusant la théorie du tout-électrique. La conclusion est sans appel. Eccles comprend qu'il vient de réfuter lui-même la théorie qu'il a défendue pendant vingt ans.

Son premier réflexe est de cacher les résultats. Il imagine même de prendre des photographies de ses enregistrements à l'envers. Pourquoi? Eh bien, McIntyre est à côté de lui, et celui-ci est toujours en lien avec ses concurrents américains. Ce serait une catastrophe s'il allait tout révéler. Eccles est conscient du caractère révolutionnaire de sa découverte et de sa valeur pour un prix Nobel! Toujours capable de changer d'avis rapidement, dès lors qu'il devient convaincu par les arguments adverses, il a pris son parti: il va admettre la vérité et être le premier à la révéler.

Reste à trouver le bon moyen de la mettre en scène. L'occasion se présente quand le président du Magdalen College d'Oxford invite Eccles à venir donner une série de huit conférences. Puis il fait son coup de théâtre au milieu de la réunion de la Physiological Society de Londres. Il explique que, suivant la philosophie de son éminent ami, Karl Popper, il a cherché à réfuter sa propre théorie et que, contre toute attente, il y est parvenu. Quelques mois plus tard, la prestigieuse réunion du Cold Spring Harbor Laboratory, aux États-Unis, a lieu sur le thème du neurone. Eccles y expose ses résultats organisés sous forme d'un modèle qui reprend celui de ses collègues britanniques, Alan Hodgkin et Andrew Huxley.

L'ancien rival d'Eccles, Henry Dale, qui avait depuis le début défendu la théorie chimique de la synapse, comparera alors en 1954 ce revirement à la conversion de saint Paul sur le chemin de Damas. À l'instar de ce dernier, Eccles, après avoir «persécuté» les tenants de la neurotransmission chimique, est devenu leur plus ardent défenseur. Seule différence: la lumière de la conversion n'est pas venue du Christ, mais du souci d'invalider ses propres convictions pour s'acheminer vers la vérité. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-G. Barbara, **La Naissance du neurone**, Vrin, pp. 120-131, 2010.

J.-G. Barbara, **Le Paradigme neuronal**, Hermann, 2010.

J. Scott, **Sir John Carew Eccles [...]**, *Proc. Am. Phil. Soc.*, vol. 150(4), pp. 673-678, 2006.

P. Andersen, **The view from inside**, *Brain Research Bulletin*, vol. 50(5/6), pp. 305-306, 1999.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique et calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

LES INTRIGANTS CHEMINS DE LA FOURMI DE LANGTON

Elle va et vient et occupe petit à petit une zone infinie du plan: la fourmi automatique de Langton décrit des trajectoires dont la complexité ne livre que lentement ses secrets.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Une compétition permanente se déroule entre chercheurs en mathématiques et en informatique: il s'agit de trouver des systèmes de règles aussi simples que possible engendrant de la complexité et de l'imprévisible. D'étonnantes découvertes sont régulièrement proposées et il faut souvent des années pour comprendre ces situations définies par quelques mots!

La «fourmi de Langton» est l'un de ces systèmes mystérieux. On l'étudie depuis plus de trente ans. D'année en année, on comprend mieux la complexité qu'elle engendre à partir de presque rien, mais la conjecture la plus simple la concernant reste non résolue.

Cet objet a été défini en 1986 par Christopher Langton, qui était alors chercheur en informatique à l'université du Michigan à Ann Arbor. Il s'intéressait à ce qui, en informatique, peut simuler la vie et il participa à la création du domaine de recherche dénommé «vie artificielle». Voici la définition de sa fourmi:

«Sur un plan recouvert d'un quadrillage de cases blanches ou noires se déplace une flèche, la fourmi, qui prend l'orientation nord, sud, ouest, ou est. Si elle est sur une case blanche, elle tourne de 90° vers la droite, si elle est sur une case noire elle tourne de 90° vers la gauche. Ensuite, elle change la couleur de la case et avance d'une case dans la direction qu'elle indique, puis recommence. »

L'encadré 1 montre ce que donne cette règle sur un plan composé de cases blanches. Elle emprunte un trajet tortueux en laissant temporairement derrière elle des traces de son passage (puisque'elle change la couleur des cases par où elle passe). Elle repasse souvent là où

elle est déjà passée, et donc son comportement dépend en partie de son propre passé.

Son trajet est doublement surprenant. Aux étapes 97, 185 et 369, le dessin des cases présente un centre de symétrie. Pourquoi? On ne sait pas l'expliquer clairement. Voyant cela, on aurait pu s'attendre à ce que, régulièrement, une configuration symétrique réapparaisse. Ce n'est pas le cas, et après l'étape 400 une confusion totale semble s'emparer des mouvements de la fourmi: celle-ci dessine sur le plan un motif d'apparence aléatoire de plus en plus grand. Cette phase désordonnée se prolonge environ sur 10 000 étapes. Puis soudain, et c'est la seconde surprise, elle adopte un comportement répétitif décrivant un parcours complexe enroulé sur lui-même et se décalant d'une case en diagonale toutes les 104 étapes. Elle part à l'infini en laissant une trace assez large derrière elle, trace dénommée «l'autoroute». La suite est alors prévisible: du désordre est né, sans raison apparente, une structure ordonnée qui croît indéfiniment et régulièrement.

Vous pouvez mener vos propres expériences avec des logiciels disponibles sur Internet (*voir la bibliographie*). Vous remarquerez alors que, même si le plan comporte au départ des cases noires en nombre fini, et même s'il y en a beaucoup, alors, sans exception, la fourmi se met au bout d'un certain temps à construire une autoroute ayant la même forme que celle obtenue à partir du plan entièrement blanc. Seule la direction diagonale de l'autoroute change; elle peut être NO, NE, SE ou SO. J'ai essayé un très grand nombre de configurations de départ et d'autres en ont essayé encore plus: il ne se produit jamais autre chose que l'apparition de l'autoroute.

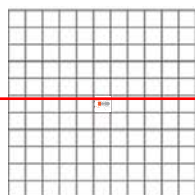
1

UN TRAVAIL DE FOURMI

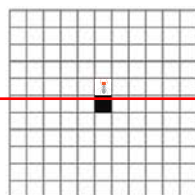


La fourmi de Langton se déplace sur un damier de cases blanches ou noires. Quand elle est sur une case blanche, elle tourne de 90° vers la droite et avance d'une case. Quand elle est sur une case noire, elle tourne de 90° vers la gauche et avance d'une case. Quand elle quitte une case, elle en change la couleur.

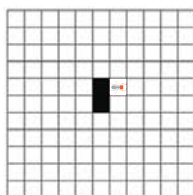
Son cheminement quand elle démarre sur un plan tout blanc est donné ci-dessous. Aux étapes 97, 185 et 360, les dessins des cases noires ont un centre de symétrie. Après un comportement complexe pendant 10 102 étapes, elle avance en diagonale de façon répétitive par cycles de 104 étapes : c'est « l'autoroute ».



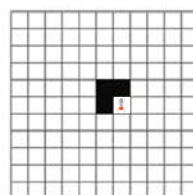
1



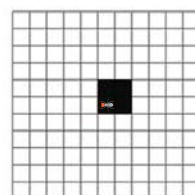
2



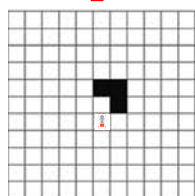
3



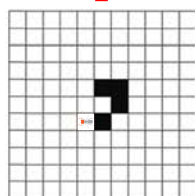
4



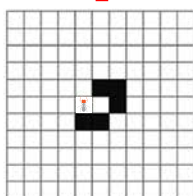
5



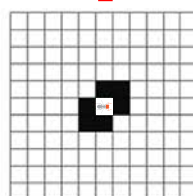
6



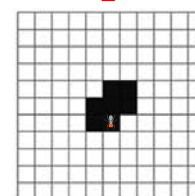
7



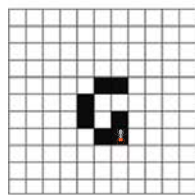
8



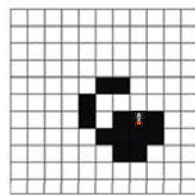
9



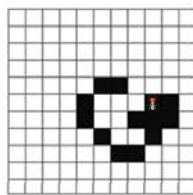
10



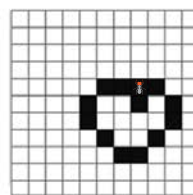
20



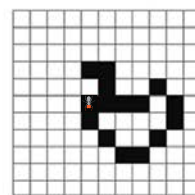
30



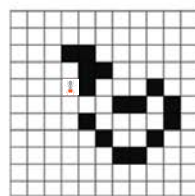
40



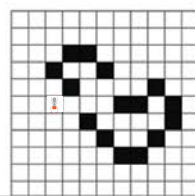
50



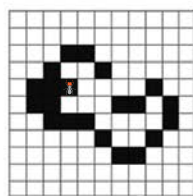
60



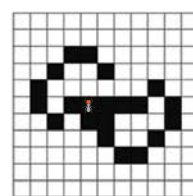
70



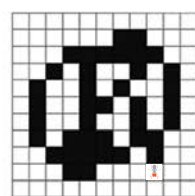
80



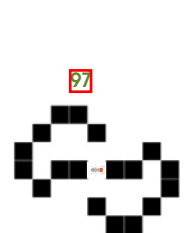
90



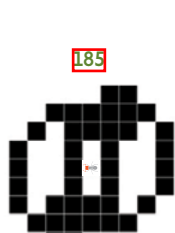
100



200



97



185



369



12000



1000



5000



10 000

On aurait pu observer un comportement périodique, ou d'autres formes de croissances infinies régulières, ou tout simplement un trajet d'apparence aléatoire non répétitif laissant progressivement des traces sur une partie non bornée du plan ou même sur tout le plan. Pourquoi n'est-ce pas le cas?

On formule une conjecture: «Quelle que soit la configuration initiale comportant un nombre fini de cases noires sur le plan, la fourmi de Langton se met, au bout d'un temps fini, à construire l'autoroute et part alors vers l'infini.» La question, posée depuis plus de trente ans, reste sans réponse.

ET S'IL Y A PLUSIEURS FOURMIS?

On a cependant obtenu un résultat qui exclue un devenir périodique: «Quelle que soit la configuration finie ou infinie de cases noires sur le plan au départ, la fourmi de Langton emprunte un trajet passant par une infinité de cases du plan et n'adopte donc jamais un comportement périodique». L'encadré 2 en donne l'astucieuse démonstration.

S'il y a plusieurs fourmis de Langton, tout change. Avec seulement deux fourmis posées sur un plan tout blanc, on peut avoir une situation périodique. La figure a de l'encadré 3 montre ce que donnent deux fourmis côte à côte, toutes deux tournées vers la droite sur une même ligne verticale. Au bout de 14 étapes, elles reviennent dans la même position, mais toutes deux tournées vers la gauche. Encore 14 étapes et elles sont revenues dans leur position initiale, cette fois avec la même orientation qu'au départ. Tout recommence donc indéfiniment: la configuration est périodique.

Le déroulement des trajets de ces deux fourmis illustre la capacité de ces fourmis à repasser à l'envers sur leurs traces en effaçant tout de leur passage: les dessins complexes laissés par les deux fourmis ont été effacés par elles-mêmes quand elles reviennent sur leurs traces.

L'explication de ces capacités à effacer ce qu'elles font provient de la réversibilité de la règle qui définit la fourmi. Si, par exemple, dans le cas d'une fourmi, vous l'arrêtez au bout de n étapes, inversez son orientation et la faites

2

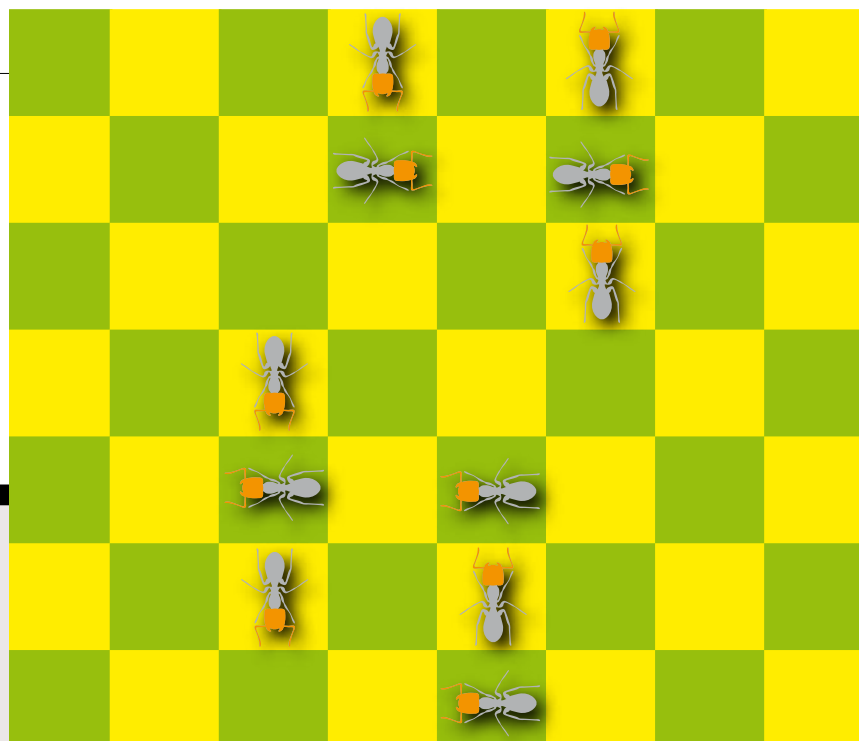
UNE FOURMI SEULE VA NÉCESSAIREMENT À L'INFINI

Leonid Bunimovich et Serge Troubetzkoy ont établi en 1992 un joli résultat: la fourmi de Langton ne peut pas avoir un comportement périodique.

Théorème. Quelle que soit la configuration initiale de cases noires et blanches, la fourmi de Langton visite un espace infini.

Démonstration. Colorions l'espace avec un damier vert et jaune. À chaque fois que la fourmi sort d'une case verte, elle entre dans une case jaune et réciproquement, et elle change sa direction d'horizontale en verticale, ou l'inverse. Il en résulte que si, au départ, la fourmi est placée horizontalement sur une case verte, elle sera toujours placée horizontalement sur les cases vertes et verticalement sur les cases jaunes.

Supposons que la fourmi ne visite qu'un espace borné. Parmi les cases visitées un nombre infini de fois, certaines sont situées le plus à gauche possible. Parmi celles-ci, il en existe une,



notons-la C, qui est la plus haute possible. Examinons-la. Supposons-la coloriée en vert. La fourmi entre dans cette case par la droite ou par la gauche. Puisque la case à gauche n'est visitée qu'un nombre fini de fois, au-delà d'un certain temps la fourmi n'entre dans cette case que par la droite. Une fois sur deux, elle ressort dans la case immédiatement au-dessus d'elle, qui serait donc une case visitée une infinité de fois. Or c'est impossible, car la case C a été choisie la plus haute possible parmi

celles visitées une infinité de fois et situées le plus à gauche possible.

On a supposé que C était verte, mais un raisonnement analogue s'applique quand C est jaune.

On a ainsi une contradiction, et la fourmi visite donc un espace non borné. **Généralisation.** Le raisonnement reste valable si l'on considère des turmites, objets similaires à la fourmi de Langton, mais avec des cases à n états parcourus cycliquement, chaque état étant associé à un changement de direction $+90^\circ$ ou -90° .

repartir, elle empruntera un trajet exactement inverse de celui emprunté jusqu'à l'étape n , et cela quelle que soit la complexité apparente des traces laissées, lesquelles disparaîtront progressivement comme si la fourmi avait mémorisé son trajet.

À l'exception de ces situations périodiques, on aurait pu penser que, généralisant le cas d'une unique fourmi, le devenir de toute configuration de n fourmis serait une partie centrale de cases noires avec n autoroutes s'en échappant. On constate effectivement très souvent ce type de situations (voir l'encadré 3, b). La conjecture qui affirmerait: «Avec n fourmis sur un plan initialement occupé par un nombre fini de cases noires, tout se termine par n autoroutes ou une situation périodique» est fautive. En effet, d'autres croissances infinies sont possibles, comme le montre le dessin c de l'encadré 3 où un carré croissant indéfiniment est engendré par deux fourmis qui tournent en une danse infinie. Une infinité d'autres évolutions illimitées différentes de n autoroutes ou du schéma du carré croissant sont possibles, et savoir ce que donnent n fourmis semble impossible autrement qu'en regardant ce qu'elles font.

Notons qu'avec plusieurs fourmis, il faut prévoir le cas où deux fourmis se retrouvent sur la même case au même instant. Une solution consiste à convenir d'un ordre entre les fourmis – elles avancent à tour de rôle selon un schéma périodique fixé – et à admettre qu'elles puissent se trouver à plusieurs sur une même case au même instant sans se gêner. Cette solution est peu satisfaisante, car il faut admettre que 1000 fourmis ou plus pourraient occuper la même case, ce qui est peu réaliste. Une autre solution est de considérer que toutes les fourmis bougent en même temps mais que, lorsque plusieurs arrivent sur une même case, elles s'entre-tuent et disparaissent. Le logiciel Golly choisit cette seconde solution.

Si toutes les fourmis (de même orientation au départ) sont sur les cases vertes d'un damier jaune et vert, le raisonnement de l'encadré 2 s'applique. Il ne peut donc pas y avoir d'évolution périodique dans ce cas. Deux devenir restent possibles: ou bien cela se bloque, car les fourmis se détruisent mutuellement et il finit par ne plus y en avoir aucune (c'est le cas pour deux fourmis placées sur une même ligne, séparées d'une case et tournées vers le haut), ou bien la configuration part à l'infini (c'est le cas pour deux fourmis sur une même ligne, séparées de 17 cases et tournées vers le haut). En revanche, si certaines des fourmis (de même orientation initiale) sont sur des cases vertes et d'autres sur des cases jaunes, alors une évolution périodique est possible.

Les turmites sont des fourmis de Langton qui se déplacent sur un plan non plus fait de cases blanches ou noires, mais sur un plan occupé par des cases de n couleurs différentes >

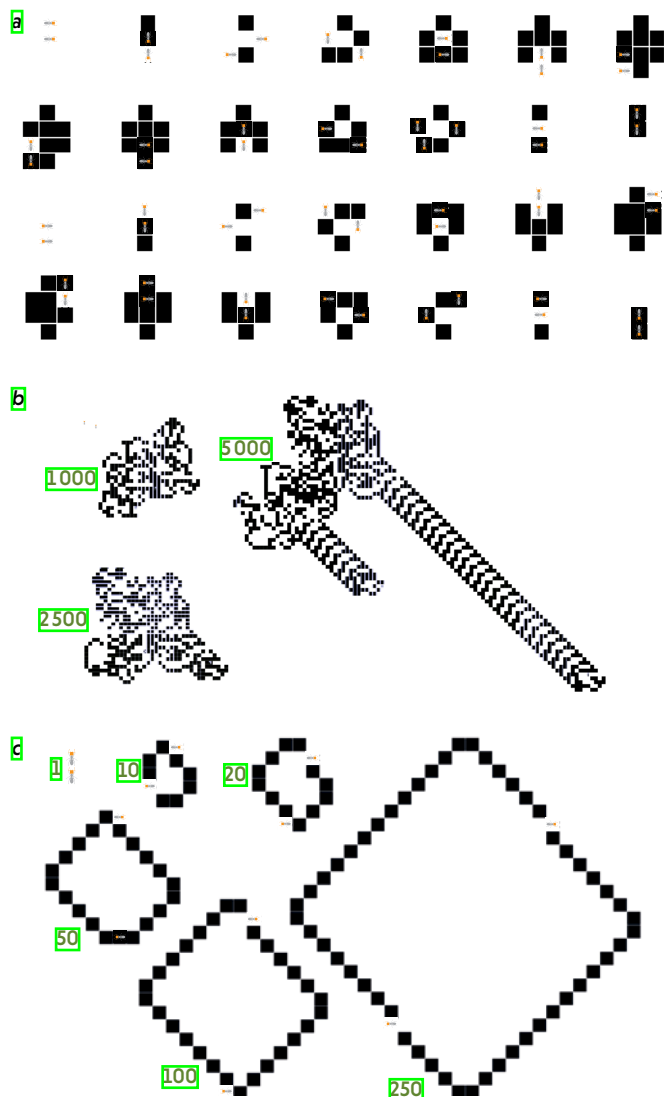
3

AVEC PLUSIEURS FOURMIS

Tout se complique lorsqu'il y a plus d'une fourmi de Langton. Il apparaît notamment des cycles. En a sont indiquées les 28 étapes qu'empruntent cycliquement deux fourmis placées initialement côte à côte sur un plan blanc.

Parfois, chaque fourmi construit son autoroute. Ainsi, en b, deux fourmis, après une période confuse, construisent chacune leur autoroute.

On est alors tenté de généraliser et de conjecturer que plusieurs fourmis donnent soit un cycle, soit plusieurs autoroutes. Cette conjecture est hélas fautive : des croissances infinies autres que l'autoroute apparaissent. La création d'un carré qui grandit indéfiniment en laissant son intérieur vide est l'un de ces comportements infinis non répétitifs (c).

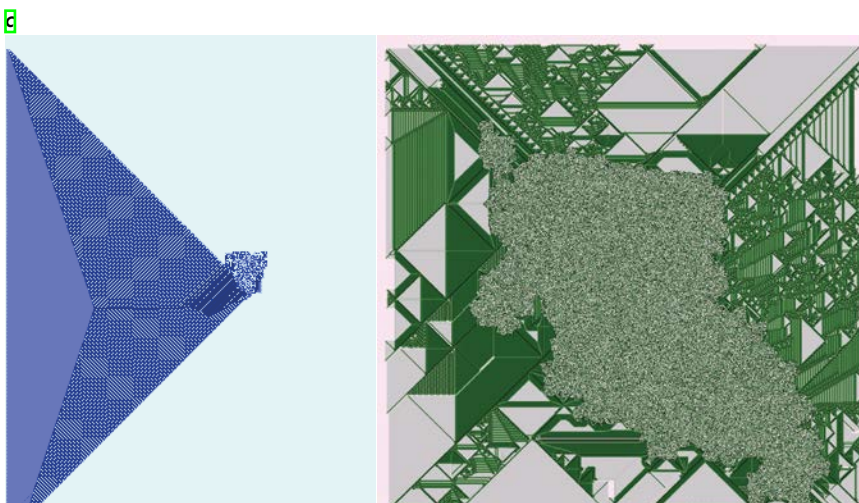
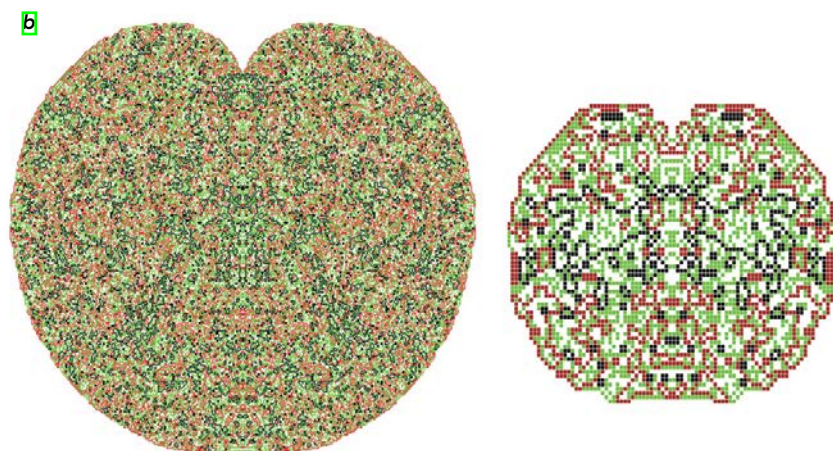
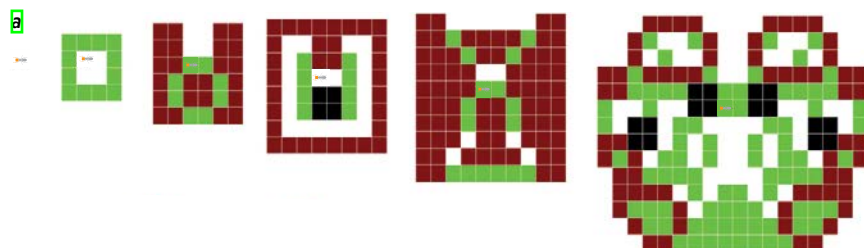


DE L'ART AUTOMATIQUE

4

Une **turmite** est une fourmi sur un plan où, au lieu de noir et blanc, il y a n couleurs possibles (par exemple quatre), auxquelles sont associées n rotations (par exemple $+90^\circ$, $+90^\circ$, -90° , -90° , auquel cas la turmite est notée 1100). Les turmites dont le code des rotations ne comporte que des doubles 0 et des doubles 1 (par exemple 1100, 111100, 00110011, etc.) ont l'extraordinaire propriété de produire régulièrement des dessins symétriques.

La figure a montre quelques-unes de ces étapes symétriques pour la turmite 1100. Les turmites donnent naissance à des dynamiques très différentes et produisent des dessins étonnants que l'on peut voir comme un art automatique imprévisible... Les images proposées ont été réalisées avec un programme de Dean Tersigni (voir www.thealmightyguru.com/Wiki/index.php?title=Langton%27s_ant).



$C_1, C_2, \dots, C_n$, chaque couleur étant associée à un changement de direction $+90^\circ$ ou -90° . On choisit par exemple quatre couleurs C_1, C_2, C_3, C_4 et les changements de direction $+90^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ et -90° . De cette suite, on tire le nom de la turmite, ici 1100. Quand la turmite est sur la case C_i , elle change sa couleur en C_{i+1} (on convient que C_n donne C_1), change de direction selon le i -ième élément de son nom et avance.

DES TURMITES POUR PLUS DE DEUX COULEURS

Le raisonnement de l'encadré 2 s'applique et l'on est donc en présence d'une variante de la fourmi de Langton qui occupe progressivement une infinité de cases. Ici, elle occupe tout l'espace (voir l'encadré 4). Ces turmites présentent une multitude de comportements étranges et tout aussi difficiles à comprendre que la fourmi de base, qui est la turmite 10.

Un comportement extraordinaire a été noté pour la turmite 1100: régulièrement, elle dessine une configuration dotée d'un axe de symétrie (voir l'encadré 4, a). Une explication mathématique de ce phénomène ahurissant a été trouvée. La démonstration de ce comportement a été publiée en 1995 par David Gale et trois autres chercheurs (voir la bibliographie). Le raisonnement occupe une dizaine de pages et prouve un résultat plus général: toute turmite dont le nom lu cycliquement (après la dernière «lettre», on revient à la première) n'est fait que de 0 ou de 1 répétés un nombre pair de fois (par exemple 1100, 0011001111, 10011001, 011110) crée une infinité de fois un dessin symétrique.

La fascination suscitée par la fourmi de Langton et ses variantes a amené des mathématiciens et informaticiens à travailler assidûment sur le sujet. Ils ont formé des groupes d'étude spécialement dédiés et un extraordinaire résultat a alors été obtenu en 2001 qui constitue une explication indirecte de la complexité des dynamiques observées.

LA COMPLEXITÉ DE LA FOURMI

Anahi Gajardo, Andrés Moreira et Eric Goles, de l'université du Chili, à Santiago, ont démontré que la fourmi de Langton a un pouvoir de calcul universel. Pour leur résultat, une seule fourmi est utilisée. Expliquons ce que signifie cette «universalité».

Un système dynamique est dit universel s'il existe, pour toute fonction $f(n)$ calculable par algorithme (par exemple $n \rightarrow n^2$, $n \rightarrow n$ -ième nombre premier, $n \rightarrow n$ -ième décimale de π , etc.), une configuration initiale du système qui conduit le système à calculer $f(0), f(1), \dots, f(n), \dots$, ces valeurs étant écrites dans les états du système selon une convention fixée. Pour la fourmi de Langton, les résultats des calculs seront inscrits en utilisant des cases noires du plan où elle circule.

BIBLIOGRAPHIE

D. Maldonado et al., **Nontrivial turmites are Turing-universal**, *Journal of Cellular Automata*, vol. 13, pp. 373-392, 2018.

X. Wang et D. Xu, **A novel image encryption scheme using chaos and Langton's Ant cellular automaton**, *Nonlinear Dynamics*, vol. 79, pp. 2449-2456, 2015.

S. Hosseini et al., **Generating pseudo-random numbers by combining two systems with complex behaviors**, *Journal of Information Security and Applications*, vol. 19(2), pp. 149-162, 2014.

A. Gajardo et al., **Complexity of Langton's ant**, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 117, pp. 41-50, 2002.

D. Gale et al., **Further travels with my ant**, *Mathematical Intelligencer*, vol. 17, pp. 48-56, 1995.

L. Bunimovich et S. Troubetzkoy, **Recurrence properties of Lorentz lattice gas cellular automata**, *Journal of Statistical Physics*, vol. 67, pp. 289-302, 1992.

C. Langton, **Studying artificial life with cellular automata**, *Physica D*, vol. 22, pp. 120-149, 1986.

LOGICIELS POUR TESTER LA FOURMI DE LANGTON

<http://golly.sourceforge.net>

<http://www.langtonant.com>

<http://www.dwmkerr.com/experiments/langtonsant/>

http://hai3.net/langtons_ant

Le «jeu de la vie» de John Conway, un célèbre système discret simple étudié depuis 1970, a été démontré universel. On a par exemple construit des configurations du jeu de la vie qui calculent la suite des nombres premiers, ou même qui définissent des machines de Turing quelconques, ce qui est un moyen efficace de démontrer qu'un système est universel.

Pour la fourmi de Langton, le problème se présentait assez mal à cause de la conjecture non démontrée que toute configuration finie du plan conduit la fourmi de Langton à construire une autoroute. Si la conjecture est vraie, alors il est impossible, en déposant un nombre fini de cellules noires sur le plan et une fourmi, de lancer une évolution calculant une infinité de valeurs $f(0), f(1), \dots, f(n), \dots$ car quand la fourmi se met à construire l'autoroute le calcul devient répétitif et est donc interrompu (sauf pour des fonctions f très simples).

La méthode des trois chercheurs de Santiago du Chili contourne l'apparente impossibilité d'une façon astucieuse dont le principe tient en trois points.

(1) Ils ont d'abord conçu des configurations finies de cases noires qui, quand on y dépose une fourmi, évoluent de manière à calculer une fonction booléenne, quelle qu'elle soit. Une fonction booléenne, par exemple $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$, selon les affirmations vraies ou fausses que l'on met à la place de a, b et c , indique si l'affirmation complexe $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$ est vraie ou fausse.

Si l'on prend pour a « $2+1=3$ », pour b «Paris est au Maroc», et pour c «le tabac est bon pour la santé», alors $(a \text{ ou } b)$ est vrai (car a est vrai), non- c est vrai, et donc $((a \text{ ou } b) \text{ et non-} c)$ est vraie.

À toute fonction booléenne $g(a, b, c, \dots)$, les chercheurs chiliens associent une configuration finie de cases noires telles qu'en fixant des valeurs booléennes pour $a, b, c, \dots$ et en modifiant quelques cases supplémentaires, la fourmi traversant la configuration laisse derrière elle une configuration de cases noires où l'on peut lire le résultat $g(a, b, c, \dots)$. Il convient de noter que le calcul d'une fonction booléenne est fini (il y a 2^n états possibles pour les n variables), et donc que la conjecture de l'autoroute n'interdisait pas cette construction.

(2) Avec ces calculateurs booléens, ils ont montré qu'on pouvait simuler n'importe quel automate cellulaire unidimensionnel.

Pour lancer le calcul infini d'un automate cellulaire de ce type, il faut au préalable noircir une infinité de cases du plan, selon un schéma répétitif. Cette préparation du plan est descriptible de manière finie (car répétitive), elle est donc acceptable dans la définition d'un système universel. Puisque cette préparation du plan introduit une infinité de cases noires, elle n'entrera pas en contradiction avec la conjecture de l'autoroute.

(3) Les chercheurs ont alors utilisé le résultat qu'il existe des automates cellulaires unidimensionnels universels. Ils en ont tiré que : pour toute fonction calculable $f(n)$, il existe une façon descriptible simplement et de manière finie de préparer le plan avec des cases noires et d'y déposer une fourmi de Langton qui en suivant son trajet transformera les zones où elle passera en laissant écrit derrière elle des configurations de cases noires représentant les valeurs de $f(0), f(1), \dots$. Précisons que si l'on change la fonction f , seules un nombre fini de cases doivent être changées dans la préparation du plan avant d'y lancer la fourmi.

La fourmi de Langton à elle seule a donc un pouvoir de calcul universel.

Il faut noter ici que l'article des trois chercheurs donne tous les détails pour effectuer les constructions, mais que celles-ci restent très difficiles à réaliser à cause de l'empilement des phases (1), (2) et (3), et qu'à ma connaissance la construction décrite n'a jamais été menée explicitement pour une fonction précise.

Une telle situation où l'on montre qu'une construction est possible sans la réaliser concrètement n'est pas nouvelle. John Von Neumann avait décrit dans les années 1940 un automate cellulaire autoreproducteur, qui n'a été concrètement programmé et mis en fonctionnement qu'en 1995. Cela illustre le pouvoir du raisonnement mathématique de démontrer l'existence d'objets sans avoir à les construire vraiment.

LA COMPLEXITÉ DES TURMITES

Le résultat de 2001 portant sur la fourmi de Langton a été généralisé en 2018 par une équipe autour de Diego Maldonado, de l'université d'Orléans, et réunissant à nouveau des chercheurs chiliens. Elle a montré que toute turmite non triviale, c'est-à-dire dont le nom n'est pas composé que de 0 ou que de 1, est universelle.

Les travaux se poursuivent et de nouvelles variantes de la fourmi ont été introduites et étudiées. En particulier, la variante du Polonais Pawel Tokarz, définie en 2018, modifie légèrement la règle de la fourmi en la faisant avancer à chaque étape de k cases (k fixé) au lieu d'une. Une variante programmable de la fourmi due à Mario Markus, Malte Schmick et Eric Goles produit une grande variété de déplacements linéaires différents de l'autoroute de Langton. La fourmi de Langton conduit aussi à des applications concrètes : en 2014, des chercheurs de l'université de Mechhed, en Iran, ont construit une fonction pseudoaléatoire utilisable en cryptographie en exploitant les comportements irréguliers de la merveilleuse fourmi et, en 2015, un schéma de chiffrement cryptographique d'images a été tiré du comportement de la fourmi par deux chercheurs de l'université de Dalian, en Chine. ■



L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

L'ASSASSIN ÉTAIT UN FICUS

Une exposition met en lumière la beauté, la richesse scientifique du monde végétal... et revient sur l'étrange affaire de l'arbre étangleur.

s'accélère. Les racines se soudent, grossissent, jusqu'à former un treillis suffisamment épais pour assurer l'autoportance du ficus. Le carcan qui enserré alors l'arbre-support l'empêche de croître en diamètre et le tue (les supports qui ne s'élargissent pas, comme les palmiers, survivent). Changé en humus, l'arbre-support nourrit ensuite le figuier qui l'a fait mourir...

Dans les forêts tropicales, les figuiers étangleurs sont des espèces clés dont dépendent d'autres espèces, notamment les guêpes de la famille des *Agaonidae*. Plus encore, en Inde, le figuier étangleur *Ficus religiosa*, aussi nommé figuier des pagodes, est un symbole d'éternité. Celui du village de Bodh-Gaya, dans l'État du Bihar, est même sacré, car c'est sous son feuillage que le bouddha aurait atteint la *bodhi*, c'est-à-dire l'éveil. Sans même être inquiété par les racines aériennes de l'arbre qui ont dédaigné son cou.

Parmi les dessins de Francis Hallé présentés à la Fondation Cartier, on découvrira d'autres arbres spectaculaires: les timides qui n'osent pas se toucher entre eux (comme certains eucalyptus d'Australie, des camphriers du Japon...), des palmiers qui collectent les feuilles mortes pour élaborer leur propre humus (sans faire de victime cette fois), le moabi du Gabon, des agroforêts du Sri Lanka...

Les œuvres du botaniste résonnent avec celles, également exposées, des communautés indigènes vivant au cœur des forêts tropicales (Nivaclés, Guaranis, Yanomamis...), qui confirment son intuition: «Je me demande si le rapport premier aux arbres n'est pas d'abord esthétique avant même d'être scientifique?» ■

«Nous les Arbres»,
jusqu'au 10 novembre 2019 à la Fondation Cartier
pour l'art contemporain, à Paris.
<http://bit.ly/FC-Arbres>



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

D

ire que les plantes sont intelligentes, c'est les sous-estimer, affirme Francis Hallé, botaniste spécialiste des forêts tropicales. Pourtant, depuis Aristote, les arbres et tout le règne végétal sont cantonnés aux plus bas étages de l'évolution. Mais le mouvement s'inverse. Ces dernières années, les plantes font l'objet d'un engouement sans pareil. C'est que, d'abord, la survie de l'humanité en dépend. Ainsi, à Paris, la mairie envisage de planter plusieurs forêts urbaines pour contenir les hausses des températures; tandis qu'une étude parue en juillet dans *Science*, menée par Thomas Crowther, de l'ETH, à Zurich, en Suisse, préconise de planter... 1000 milliards d'arbres pour réduire le réchauffement climatique mondial.

Ensuite, la science a redécouvert l'arbre. Les chercheurs mettent en évidence ses prouesses en termes de communication, de sensibilité, d'adaptation et, même, d'une certaine forme d'intelligence. Plus encore, l'arbre apparaît désormais indispensable au bien-être humain, comme l'atteste l'essor des bains de nature (le *shinrin yoku* japonais).

Il n'empêche, l'arbre ne va pas fort, comme en témoigne la déforestation débridée qui touche tous les continents, à commencer par l'Amérique du Sud, où l'Amazonie rétrécit dangereusement.

À la Fondation Cartier, à Paris, l'exposition «Nous, les arbres» s'inscrit dans cet élan et invite à réinventer notre regard sur les arbres, «des extraterrestres à nos yeux», selon Francis Hallé. Conçue par des artistes, des botanistes, des philosophes, la manifestation s'articule autour de trois axes, trois «trons»: la connaissance, l'esthétique et l'avenir. Le botaniste, pionnier de cette «réhabilitation des arbres» et inventeur du radeau des cimes y présente nombre de ses dessins. Ils associent l'œil du scientifique, son sens de l'observation, et celui, esthétique et poétique, de l'artiste.

Prenons le dessin du «ficus étangleur» (voir page ci-contre), saisi dans la forêt de Pakitza, en Amazonie péruvienne, par Francis Hallé. L'expression s'applique à plusieurs espèces du genre *Ficus* (les figuiers), de la famille des moracées, cousines des *Ficus benjamina* de nos salons. Dans la course à la lumière qui sévit dans les denses forêts tropicales, ces arbres ont adopté une stratégie étonnante.

Les graines sont transportées par les oiseaux et laissées en haut d'un arbre qui deviendra un support. Après la germination, des branches se développent vers le haut, tandis que des racines dites aériennes progressent vers le bas. Quand elles atteignent le sol, la croissance du figuier

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

COUP DE CHALEUR SUR LE CAOUTCHOUC

Remarquablement élastiques, le caoutchouc et les autres élastomères s'échauffent quand on les étire. Des propriétés que l'on explique bien en tenant compte du nombre de conformations possibles de leurs longues chaînes moléculaires.

Le savant anglais John Gough l'avait remarqué dès 1802 : lorsqu'on chauffe du caoutchouc tendu, il se contracte au lieu de se dilater ! Une variante de cette expérience est facile à réaliser. Elle consiste à étirer fortement et rapidement un ballon de baudruche depuis son état détendu ; comme l'attestent une caméra thermique ou le simple contact de l'objet avec les lèvres, le matériau ainsi allongé s'échauffe de plusieurs degrés (voir l'illustration ci-contre). Inversement, on obtient un refroidissement du même ordre lorsqu'on relâche complètement le caoutchouc après l'avoir maintenu étiré.

Comment expliquer ces propriétés inattendues ? Il a fallu attendre les années 1930 pour commencer à comprendre leur origine microscopique.

Le caoutchouc et les autres matériaux élastomères sont constitués de chaînes

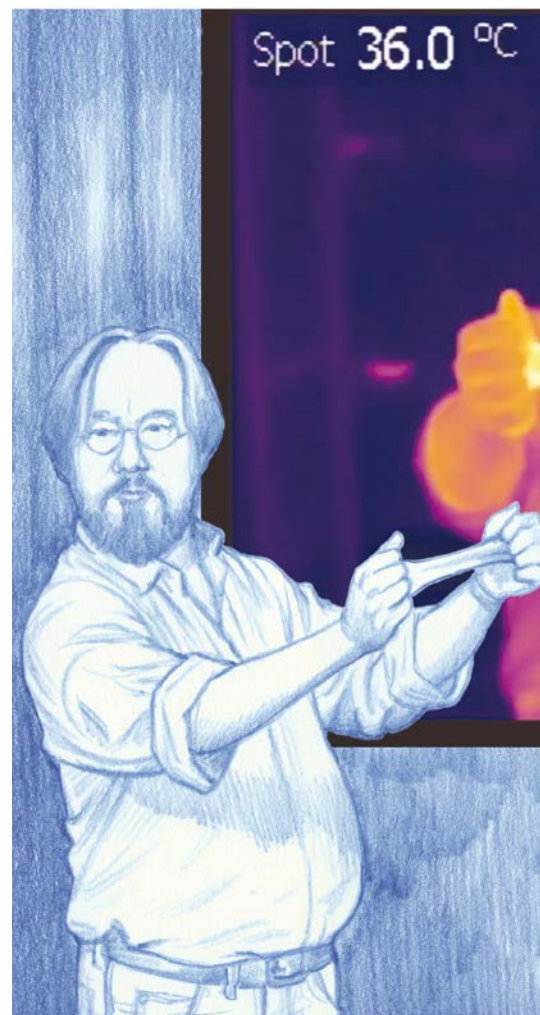
moléculaires longues et flexibles. Par exemple, les chaînes du caoutchouc naturel résultent de la polymérisation de milliers d'unités d'isoprène, une molécule organique à squelette linéaire formé de quatre atomes de carbone.

UNE LONGUE CHAÎNE QUI SE TORTILLE

Chaque chaîne est très flexible, les liaisons successives carbone-carbone pivotant aisément l'une par rapport à l'autre. Deux segments séparés par quelques liaisons peuvent donc avoir des orientations très différentes. De plus, à part l'impossibilité pour les atomes de s'interpénétrer, les différents maillons de la chaîne n'interagissent quasiment pas.

Toutes les conformations possibles de la chaîne, qui diffèrent par les orientations de ses segments et la position de ses extrémités, ont ainsi la même énergie. Par conséquent, lorsque la chaîne polymère

Quand on étire un ballon de baudruche, sa température augmente. Dans cette expérience filmée avec une caméra thermique, la température est passée d'environ 23 °C à 36 °C.



est libre, toutes ces configurations ont la même probabilité de se réaliser.

Ces caractéristiques sont communes à la vaste famille des élastomères. On peut mettre en évidence leur lien avec les propriétés élastiques de ces matériaux en effectuant des expériences sur une chaîne unique plongée dans un solvant.

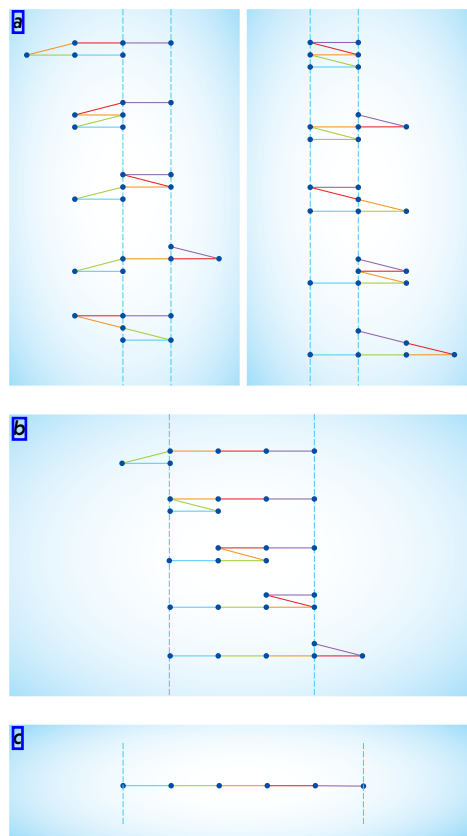
Que constate-t-on ? Si l'on fixe l'une des deux extrémités de la chaîne, celle-ci

Les auteurs ont récemment publié :
En avant la physique !, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



CONFORMATIONS D'UNE CHAÎNE À 1D

Considérons, à une dimension, une chaîne formée de cinq maillons, chacun long de une unité. Lorsque les extrémités de la chaîne sont écartées de 1 unité de longueur, la chaîne peut adopter 10 conformations distinctes (a). Lorsque l'écartement (repéré par les lignes en pointillés) est de 3 unités de longueur, il n'y a plus que 5 conformations possibles (b). Et lorsque l'écartement est de 5 unités (les écartements d'un nombre pair d'unités sont impossibles), il ne reste qu'une seule conformation possible (c). Cet exemple simple à une dimension montre ainsi qu'à mesure que l'écartement de la chaîne augmente, l'entropie diminue.



forme une sorte de pelote sphérique dont le rayon est bien plus petit que la longueur de la chaîne complètement étirée. Les chocs, sous l'effet de l'agitation thermique, de la chaîne avec les molécules du solvant modifient sans cesse sa conformation. En moyenne temporelle, la position de l'extrémité libre coïncide avec la position de l'extrémité maintenue fixe, au centre de la pelote.

Tenons maintenant les deux extrémités et écartons-les. On constate alors que la chaîne continue de se tortiller, mais qu'elle exerce une force de rappel qui tend à faire coïncider, en moyenne, les deux extrémités. Remarquablement, cette force

est proportionnelle à la distance entre les deux extrémités lorsque cette dernière est faible devant la longueur de la chaîne. Celle-ci se comporte donc comme un ressort idéal – mais un ressort particulier, dont la raideur augmente avec la température! Un comportement très différent des ressorts métalliques, dont la raideur dépend peu de la température, car elle provient de l'étirement ou de la compression des liaisons entre atomes.

Cette chaîne exhibe en fait le comportement décrit par Gough: si l'on augmente la température en maintenant l'écartement fixe, la force de rappel augmente; ou, ce qui est équivalent, si l'on maintient la

force d'étirement constante, l'allongement de la chaîne diminue.

Mais si la force élastique ne provient pas de l'étirement ou la compression de liaisons entre atomes, d'où provient-elle?

UNE QUESTION D'ENTROPIE

L'énigme s'éclaircit si l'on fait appel à la physique statistique. Lorsque la chaîne n'est pas contrainte, le nombre de ses conformations possibles (qui sont équiprobables) est maximal. Dans le vocabulaire de la thermodynamique, cela correspond à un état d'entropie maximale.

Et si l'on impose un écart entre les extrémités de la chaîne? Dans ce cas, plus

l'écart est important, plus le nombre de conformations possibles se réduit – et l'entropie avec. On le voit aisément sur l'exemple d'une petite chaîne à une dimension (voir l'encadré de la page précédente). Cette diminution de l'entropie est encore plus marquée lorsque la chaîne comporte des centaines ou des milliers de maillons et qu'elle peut se mouvoir dans les trois dimensions de l'espace.

Quelle est la conséquence de ce fait sur les propriétés physiques de la chaîne polymérique? On peut l'anticiper en invoquant un système plus familier qui présente certaines similitudes avec notre chaîne: un gaz très peu dense.

ANALOGIE AVEC UN GAZ DILUÉ

L'énergie interne d'un tel gaz est la simple somme des énergies cinétiques de ses molécules, et ne dépend donc pas du volume dans lequel le gaz est confiné. S'il n'est pas confiné (volume infini), le nombre de configurations possibles – le nombre de façons qu'ont les molécules de se répartir dans l'espace – est maximal. La pression du gaz est alors nulle.

Si l'on confine le gaz dans un volume fini, le nombre de configurations de ses molécules diminue, et avec elle l'entropie. Dans ce cas, le gaz exerce une pression non nulle sur les parois, et il faut par conséquent exercer des forces pour maintenir ce volume ou le réduire.

De façon analogue, lorsqu'on cherche à maintenir les extrémités de la chaîne polymérique écartées d'une distance non nulle, on réduit le nombre de configurations possibles de la chaîne et, en y regardant de plus près, le volume accessible à ses différentes unités (voir l'encadré ci-dessus). Il apparaît alors naturellement, comme la pression pour le gaz, une force qui s'oppose à ce que les extrémités soient plus écartées, ce qui réduirait encore l'entropie.

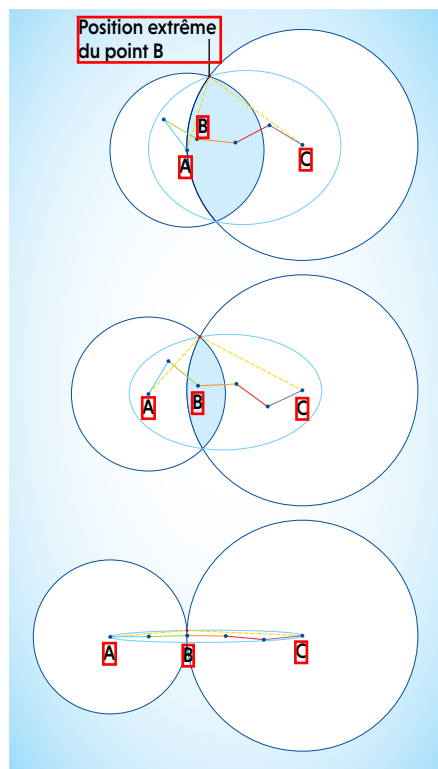
Dans les deux cas, c'est la réduction du nombre des configurations/conformations accessibles, soit un effet purement entropique, qui explique l'origine de la pression/force de rappel.

Cette interprétation par des considérations d'entropie est, dans le cas d'un gaz, parfaitement compatible avec l'approche cinétique, qui consiste à comprendre comment les molécules du gaz, par leurs chocs sur les parois (qui sont de plus en plus fréquents à mesure que le volume diminue), exercent une pression.

Dans le cas de la chaîne polymérique, une autre interprétation est aussi possible, mais elle est plus complexe à mener.

RÉDUCTION DU CHAMP DES POSSIBLES

Pour une chaîne de 5 maillons, longs chacun de 1 unité, et ayant pour extrémités les points A et C, on considère l'espace (ici la surface) qui lui est accessible en fonction de l'écartement AC. Cet espace est délimité par une ellipse (en bleu clair) dont les foyers sont A et C (car pour tout point X de la chaîne, on doit avoir $AX + XC \leq 5$, la longueur de la chaîne). Pour le point particulier B, situé à 2 unités de A et à 3 unités de C, l'espace accessible (en bleu) est l'intersection du cercle de centre A et de rayon 2 avec le cercle de centre C et de rayon 3. On voit que quand A et C s'écartent, ces espaces accessibles se réduisent : l'entropie diminue. Cela permet d'expliquer l'échauffement d'un élastomère que l'on étire.



Elle consiste à considérer les contraintes dues aux liaisons chimiques au sein de la chaîne, d'où résultent des forces qui se transmettent le long de la chaîne jusqu'aux extrémités. On en conclut qu'il faut appliquer une force pour maintenir la distance entre ces extrémités.

Et de la même façon que la paroi d'un piston que l'on comprime accélère comme une raquette les molécules qui le frappent, ce sont les liaisons entre monomères qui transforment en énergie cinétique des maillons de la chaîne, donc en chaleur, le travail que l'on fournit lorsque l'on étire cette dernière.

Reste à passer d'une chaîne moléculaire unique à un élastomère massif. Les chaînes sont dans cette situation beaucoup moins libres de se mouvoir, car elles sont fortement confinées par les chaînes environnantes et reliées entre elles par des ponts moléculaires qui assurent la cohésion de l'ensemble et son caractère solide. Il en résulte un réseau tridimensionnel extrêmement complexe où, entre deux nœuds, les chaînes comportent quelques centaines de maillons.

Il n'en demeure pas moins que la réduction du nombre de conformations de tout ce réseau reste à l'œuvre quand on étire l'élastomère. D'où les mêmes propriétés élastiques et thermiques que pour la chaîne unique. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Roundy et M. Rogers, **Exploring the thermodynamics of a rubber band**, *American Journal of Physics*, vol. 81(1), pp. 20-23, 2013.

J. H. Weiner, **Entropic versus kinetic viewpoints in rubber elasticity**, *American Journal of Physics*, vol. 55(8), pp. 746-749, 1987.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

QUAND LES PLANTES GRAVISSSENT LES MONTAGNES

Les plantes à fleurs du volcan Chimborazo, en Équateur, poussent plusieurs centaines de mètres plus haut qu'en 1802 sous l'effet du réchauffement climatique. Mais elles ne font pas que se déplacer...

Le Chimborazo, en Équateur, est un volcan colossal, dont la base mesure 20 kilomètres de diamètre. Déjà en 1736, l'explorateur français Charles Marie de La Condamine avait gravi ses pentes, jusqu'à 4755 mètres d'altitude, lors d'un voyage visant à mesurer la longueur d'un arc de méridien de 1 degré près de l'équateur. Le 23 juin 1802, c'est au tour du naturaliste allemand Alexander von Humboldt et de son acolyte, le botaniste français Aimé Bonpland, d'entreprendre son ascension. Ils arrivent à 5920 mètres, dans le glacier sommital qui débute dès 4814 mètres.

A partir de 4600 mètres, plus de plantes à fleurs, ils ne trouvent que des lichens. Au fur et à mesure de leur ascension, les deux naturalistes herborisent en relevant avec précision les altitudes de leurs prélèvements. C'est alors qu'ils remarquent que le port des plantes

d'altitude ressemble à celui des plantes en haute latitude: elles sont plus ramassées, à croissance lente, avec des formes en rosette ou en coussinet. Sur les pentes du Chimborazo, ils ont l'impression de parcourir en réduction les climats de la Terre, des Tropiques à l'Arctique.

En 2012, une équipe internationale organisée par Jens-Christian Svenning, de l'université d'Aarhus, au Danemark, décide de rééditer cette mémorable ascension, et de retrouver les lieux des prélèvements de Humboldt et Bonpland. Surprise: la limite des plantes à fleurs est de 5185 mètres, soit plus de 500 mètres plus haut qu'il y a 210 ans! Le glacier a fondu et s'est rétracté à 5270 mètres, soit 450 mètres plus haut qu'auparavant. La végétation a donc gagné en altitude sous l'effet du réchauffement climatique. On pourrait penser que les plantes se sont contentées de garder leur environnement de prédilection: elles ont tenté leur chance aux alentours et persisté



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**L'Aventure de
la biodiversité,**
(Belin, 2018).

Le Chimborazo (ici vu depuis le plateau de Tapia, en Équateur, sur une gravure illustrant le récit du voyage de Humboldt et Bonpland, publié en 1810) est le plus haut volcan du monde.

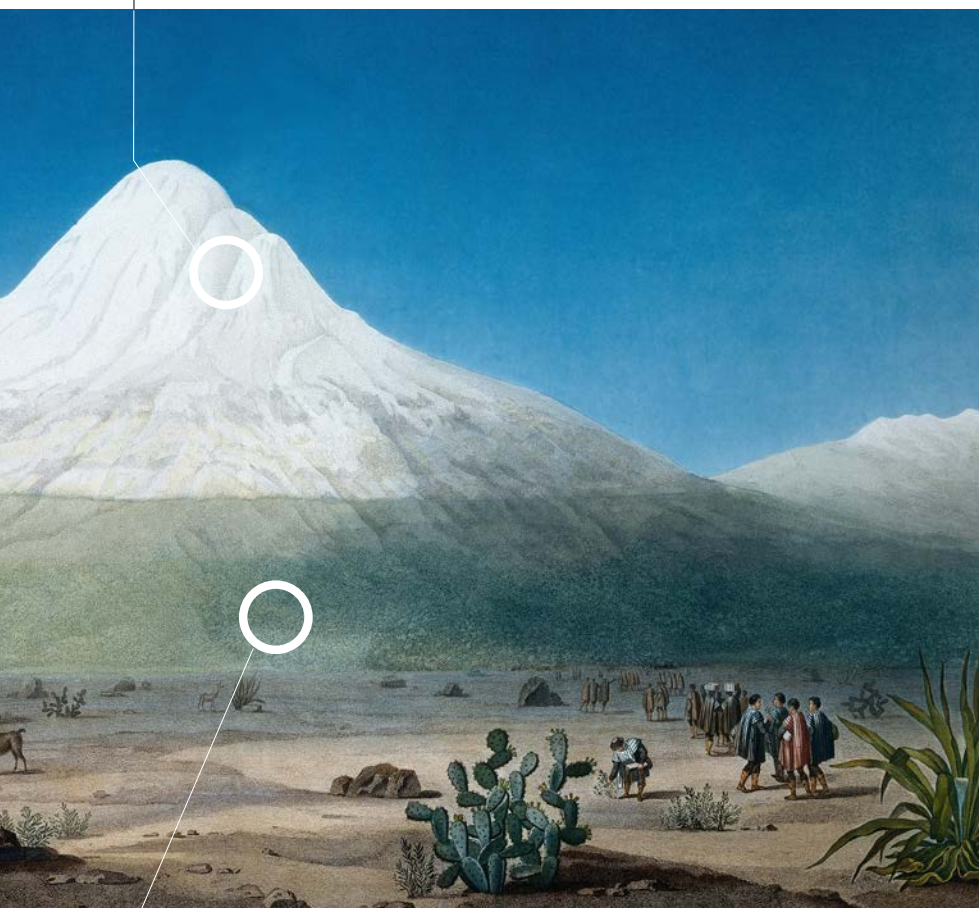
EN CHIFFRES

6 268

C'est la hauteur en mètres du Chimborazo au-dessus du niveau de la mer. Mais, vu l'aplatissement de la Terre aux pôles, il dépasse l'Everest (8 848 mètres au-dessus du niveau de la mer) de 2 kilomètres, si l'on mesure à partir du centre de la Terre.

500 ou 250 ?

La végétation sur le Chimborazo est-elle montée de 500 ou de 250 mètres depuis les relevés d'Alexander von Humboldt, en 1802 ? Telle est la question que Pierre Moret, de l'université de Toulouse, et ses collègues ont soulevée en mai 2019. En effet, après une analyse fine des archives du naturaliste, il apparaît que les données correspondant aux plus hautes altitudes n'ont pas été mesurées sur le Chimborazo, mais sur un volcan andin plus au nord, l'Antisana. Or, sur celui-ci, les plantes ont plutôt migré de l'ordre de 250 mètres. Néanmoins, que les plantes soient montées de 500 ou 250 mètres en deux siècles, cela reste énorme.



Le 23 juin 1802, Alexander von Humboldt et Aimé Bonpland entreprirent son ascension. En s'appuyant sur l'étagement de sa végétation en fonction de l'altitude, ils ont posé les bases de l'écologie et de la biogéographie végétale – l'étude de la répartition des végétaux dans le paysage et des facteurs de cette répartition.

là où les conditions étaient optimales. Toutefois, plusieurs indices suggèrent que les choses sont plus complexes...

DES PLANTES GRIMPENT, D'AUTRES DESCENDENT...

Humboldt avait souligné deux étages importants : l'espace entre 2 000 et 4 100 mètres, caractérisé par l'association de gentianes et d'astéracées des Andes, et l'alpage, entre 4 100 et 4 600 mètres, dominé par les poacées. Aujourd'hui, les gentianes et les astéracées se détectent à partir de 3 800 mètres et sont très abondantes entre 4 200 et 4 800 mètres ; les poacées, elles, peuplent l'alpage entre 3 800 et 4 600 mètres, avec des stations isolées

jusqu'à 5 000 mètres. Globalement, les étages ont donc eux aussi migré de 400 à 500 mètres. Cependant, les zones définies par Humboldt et Bonpland se retrouvent maintenant chevauchantes : certes, les plantes grimpent, mais aussi descendent !

Or, à la fin du XIX^e siècle, le botaniste Gaston Bonnier s'est aperçu que les plantes non seulement se déplacent, mais ont aussi la capacité de modifier leurs traits avec l'altitude. Il avait lancé une série d'expériences pour étudier le port particulier des plantes alpines. Il souhaitait se focaliser sur des espèces vivant en plaine comme en montagne, mais avec des morphologies caractéristiques de leurs milieux, comme l'héliantheme commun (*Helianthemum nummularium*) ou le buplèvre en faux (*Bupleurum falcatum*). En plaine, Bonnier avait donc choisi des pieds, les avait divisés et en avait laissé une moitié sur place pour planter l'autre en altitude, dans les Alpes ou les Pyrénées. En dix ans, il avait traité plus de cent cinquante espèces !

Il a ainsi remarqué que les caractères de montagne s'acquièrent rapidement, en quelques années (voir l'encadré page 94). Il suggéra que les espèces purement alpines étaient apparues de cette manière, après disparition de la forme de plaine.

Le mécanisme de ces transformations est resté mystérieux pendant un siècle, mais les travaux récents de trois

équipes qui se sont inspirées du protocole de Bonnier suggèrent qu'il s'agirait de régulation épigénétique, c'est-à-dire des modifications de l'expression des gènes, transmissibles au cours des divisions cellulaires ou à travers les générations et qui ne changent pas la séquence d'ADN.

LA PISTE ÉPIGÉNÉTIQUE

Une première équipe, autour de Vigdis Vandvik, de l'université de Bergen, en Norvège, s'est intéressée à la plasticité phénotypique des feuilles des espèces les plus courantes des alpages du mont Gongga, le plus haut sommet du Tibet oriental, dans l'actuelle province chinoise du Sichuan. En d'autres termes, elle a suivi les variations de leurs traits : surface et épaisseur des feuilles, masse de matière sèche, teneur en carbone, azote et phosphore, ainsi qu'en isotopes du carbone et de l'azote. Les traits les plus plastiques étaient la surface des feuilles, et la teneur en isotope ^{15}N de l'azote et en phosphore, qui augmentaient avec l'altitude, témoignant d'un métabolisme plus actif.

Une deuxième équipe, autour d'Adrienne Nicotra, de l'université de Canberra, en Australie, s'est intéressée à *Wahlenbergia ceracea*, une campanulacée classique des alpages des montagnes australiennes. Cette fois, les chercheurs ont collecté les graines suivant un gradient d'altitude (entre 1600 et 1975 mètres) sur le mont Kosciuszko, en Nouvelle-Galles du Sud. Afin de tester la plasticité adaptative des plantes en réponse au réchauffement climatique, ils ont réalisé des germinations sous différentes températures et suivi différents traits : hauteur, diamètre de la rosette, nombre de feuilles, masse, nombre des fruits.

L'origine des graines s'est révélée déterminante : seules les plantes provenant d'une basse altitude présentaient une plasticité adaptative. Les autres ne changeaient pas d'aspect avec la température. De plus, les germinations issues de graines collectées à basse altitude répondaient par des variations épigénétiques importantes : le profil de méthylation de leur ADN (la cartographie des groupes méthyl associés à l'ADN) variait selon la température de culture.

La troisième équipe, autour de Sonja Siljak-Yakovlev, de l'université Paris-Sud, s'est intéressée à trois populations de lys bosniaque (*Lilium bosniacum*). L'une correspondait aux conditions optimales de la plante, à moyenne altitude (1200 mètres), sur roche calcaire ; les deux autres à des

PLAINE OU ALTITUDE ?

Le buplèvre en faux (*Bupleurum falcatum*) est une apiacée qui vit en plaine comme en montagne (à gauche, un spécimen de plaine). Au XIX^e siècle, Gaston Bonnier a divisé un pied en plaine, gardant une partie à cette altitude et plantant l'autre dans les Pyrénées, à 2 400 mètres d'altitude. Dix ans plus tard, la plante d'altitude ressemblait, en plus petit, à un *Bupleurum ranunculoides* (à droite) : système racinaire plus développé, tige simple, entrenœuds courts et feuilles seulement à la base, plus épaisses et foncées, formant une pseudorosette. Ainsi, l'environnement peut transformer l'aspect d'un organisme, ce qu'à l'époque n'expliquait pas le darwinisme...



conditions stressantes – haute altitude (entre 1800 et 2000 mètres), sur roche calcaire, et plus basse altitude (850 mètres), mais sur sol riche en serpentines, c'est-à-dire contenant des éléments toxiques tels que des ions nickel.

Les lys d'altitude présentaient un faciès alpin, avec une réduction de leur taille et du nombre de fleurs par plant. Les lys issus des serpentines arboraient aussi des différences morphologiques et des réarrangements de leurs chromosomes. Par ailleurs, l'ADN de ces deux populations était très peu méthylé. Or un rôle de la méthylation est d'empêcher des fragments mobiles d'ADN – les « éléments transposables » – de se déplacer ou de se dupliquer au sein du génome. De tels éléments pourraient être à la source des réarrangements chromosomiques et, par là, des traits observés.

Ces études suggèrent que la migration des plantes le long des pentes du Chimborazo, sous l'influence du réchauffement, ne correspond pas uniquement à la recherche d'un optimum climatique. Le dérèglement écologique semble sous-tendu par un dérèglement moléculaire – épigénétique – qui, autorisant une mobilisation d'éléments transposables, induit des changements génétiques définitifs. Ainsi, la réaction au réchauffement climatique est un problème non seulement écologique, mais aussi, et surtout, évolutif. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. J. Henn et al., **Intraspecific trait variation and phenotypic plasticity mediate alpine plant species response to climate change**, *Front. Plant Sci.*, vol. 9, article 1548, 2018.

V. Zoldoš et al., **Epigenetic differentiation of natural populations of *Lilium bosniacum* associated with contrasting habitat conditions**, *Genome Bio. Evol.*, vol. 10(1), pp. 291-303, 2018.

N. Morueta-Horne et al., **Strong upslope shifts in Chimborazo's vegetation over two centuries since Humboldt**, *PNAS*, vol. 112, pp. 12741-12745, 2015.

A. Nicotra et al., **Adaptive plasticity and epigenetic variation in response to warming in an alpine plant**, *Ecol. Evol.*, vol. 5(3), pp. 634-647, 2015.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493



N° 492 (oct. 18)
réf. PL492



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491

A retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1 ^{re} réf.	_____	01	x 9,90 € =	9,90	€
2 ^e réf.	_____		x 9,90 € =		€
3 ^e réf.	_____		x 9,90 € =		€
4 ^e réf.	_____		x 9,90 € =		€
5 ^e réf.	_____		x 9,90 € =		€
6 ^e réf.	_____		x 9,90 € =		€

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone : _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration : _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

JUTOSITÉ ET TENDRETÉ

On peut contrôler parfaitement ces deux qualités sur un système de perles culinaires à cœur liquide, analogues à des œufs de saumon.

En matière de gastronomie, il y a bien sûr l'aliment, mais il y a aussi le Verbe, et le cuisinier François la Varenne disait très justement que les morceaux caquetés en paraissent meilleurs: il s'agit de parler de ce que l'on mange et de ne pas se contenter de se repaître en animal. Déguster, ce n'est pas seulement faire un mouvement des mâchoires, mais mettre les bons mots sur les bonnes sensations. Bien connaître un produit, c'est être capable d'en avoir une consommation analytique, descriptive avant d'être appréciative.

Et pour une viande, au-delà de la couleur ou de l'odeur de la viande crue, au-delà de l'à-point de cuisson, il y a la jutosité et la tendreté. Jutosité? Tendreté? Pour ces deux caractéristiques, le nombre de syllabes crée l'abstraction... même si l'on comprend que la jutosité décrit le fait qu'une viande soit juteuse, et que la tendreté (à ne pas confondre avec la tendresse) décrit le fait qu'elle soit tendre. Mais au-delà de cette description tautologique, de quoi s'agit-il vraiment?

La tendreté, c'est quand la dent s'enfonce dans la viande comme dans du beurre, et la jutosité, c'est quand l'action de compression et de cisaillement libère du jus, qui vient inonder la bouche et favoriser la déglutition, en même temps que les solutés portés par le jus peuvent facilement se mêler à la salive, afin d'aller stimuler les récepteurs sensoriels buccaux.

Plus concrètement encore? Un modèle expérimental s'impose. Commençons par utiliser l'alginate de sodium, un polysaccharide linéaire extrait d'algues, et des ions calcium Ca^{2+} : quand on fait tomber, dans une solution d'alginate de sodium, des

Dans cette «conglomère», la couleur des perles, ou «degennes», est celle du jus d'orange qu'elles contiennent.

gouttes d'une solution contenant des ions calcium, on obtient une gélification immédiate de l'alginate à la surface des gouttes, ce qui produit des objets analogues à des œufs de saumon, les ions calcium venant ponter les molécules d'alginate. Ces œufs artificiels sont des objets culinaires que j'ai proposé de nommer «degennes», en mémoire de Pierre-Gilles de Gennes, Prix Nobel de physique en 1991 pour ses travaux sur la matière molle. Évidemment, chacun de ces degennes est parfaitement tendre et juteux.

Emplissons-en un bol et coulons par-dessus une solution de gélatine à environ 5%. Après gélification de la gélatine, on obtient une reproduction d'un tissu végétal, lequel ne diffère structurellement de la viande que par le fait que les cellules sont sphériques et non pas de longs tubes. Quand on met en bouche ces «conglomères», la dent rompt sans mal les parois des perles d'alginate, de sorte que l'on a un système à la fois tendre et juteux.

Répétons maintenant l'opération, mais avec un gel bien plus chargé en gélatine, par exemple 20%: cette fois, si la quantité de degennes dispersés dans le gel de gélatine est grande, alors le système reste juteux, mais il n'est plus tendre. Et l'on comprend alors que si l'on réduit la quantité de degennes dans les gels de gélatine à 5% et à 20%, on obtiendra respectivement



des systèmes tendres et peu juteux, ou peu tendres et peu juteux.

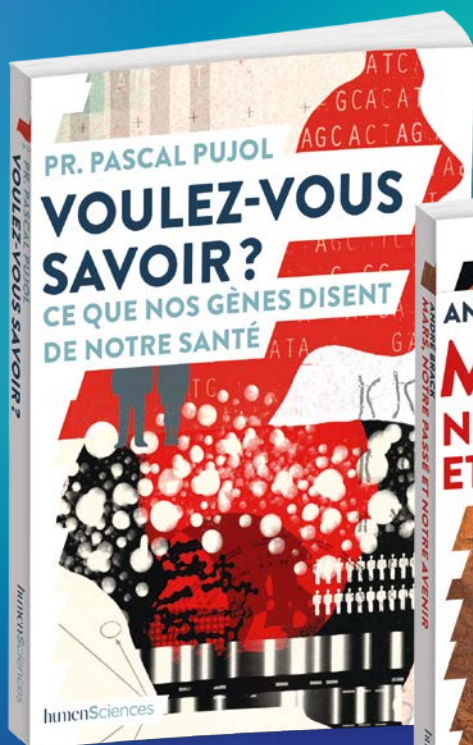
Nous avons ainsi les quatre coins d'un carré dans l'espace des jutosités et des tendretés: désormais, nous pourrions y inscrire les viandes que nous rencontrons et pourrions véritablement manger en gastronomes. ■



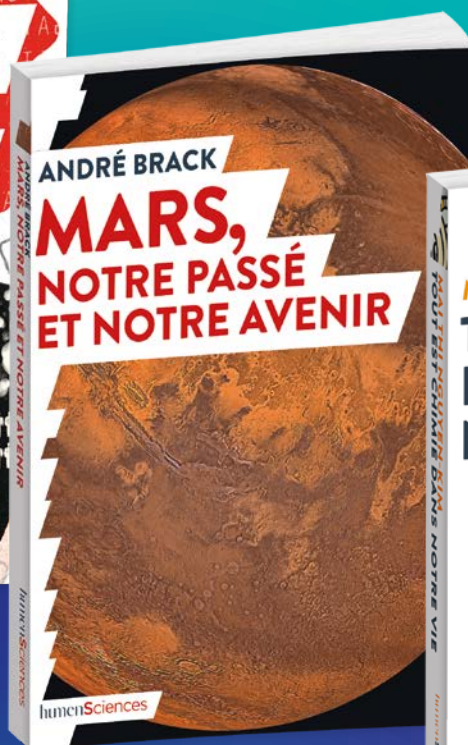
LA RECETTE

- 1 Préparer un bain d'alginate de sodium en dissolvant ce composé dans de l'eau pauvre en calcium, à raison de 5 à 10 grammes d'alginate de sodium par litre d'eau.
- 2 Dans un liquide goûteux (par exemple du jus d'orange), ajouter un sel de calcium, dans les mêmes proportions.
- 3 Faire tomber le liquide additionné de calcium dans le bain d'alginate de sodium.
- 4 Récupérer les «degennes» formés et les répartir dans quatre bols: beaucoup de degennes dans les deux premiers bols (1 et 2) et peu dans les deux autres (3 et 4).
- 5 Faire une infusion de menthe et la diviser en deux parties.
- 6 Ajouter 5 % de gélatine (en masse) dans la première partie, chauffer pour dissoudre la gélatine et couler la solution obtenue dans les deux bols 1 et 3. Laisser gélifier.
- 7 Ajouter 20 % de gélatine (en masse) dans la seconde partie, chauffer pour dissoudre la gélatine, et couler la solution obtenue dans les deux bols 2 et 4. Laisser gélifier.
- 8 Goûter les conglomères pour apprécier la jutosité et la tendreté.

SANTÉ, COSMOS, CHIMIE, QUELLE EST VOTRE RENTRÉE SCIENCE ?



EN LIBRAIRIE
LE 28 AOÛT



EN LIBRAIRIE
LE 4 SEPTEMBRE



EN LIBRAIRIE
LE 11 SEPTEMBRE

humenSciences
fait rentrer la science dans votre vie



humensciences.com

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.50

ROSSBY

Dans l'atmosphère et les océans, de larges ondes, dites de Rossby, circulent sur des centaines de kilomètres, créées dans l'air et l'eau par la rotation de la Terre.

P.80

TURMITE

Contraction de « Turing » et « termite », une turmite est un automate cellulaire en informatique théorique. Il s'agit de la généralisation de la « fourmi de Langton ». Cette dernière se déplace au sein d'un quadrillage bidimensionnel selon certaines règles et induit un changement de la couleur de chaque case qu'elle visite.

P.24

« L'engagement en faveur de la science porte une contradiction: il s'agit de convaincre de la véracité d'énoncés scientifiques à l'aide d'une rhétorique relevant du militantisme »

VIRGINIE TOURNAY
directrice de recherche au Cevipof

P.9

0,9

D'après une étude récente, 0,9 milliard d'hectares seraient disponibles pour la reforestation. De quoi piéger près des deux tiers des émissions anthropiques totales depuis le début de l'ère industrielle.

P.92

BUPLÈVRE EN FAUX

Au XIX^e siècle, le botaniste Gaston Bonnier a prélevé en plaine un pied de cette plante pour le faire pousser en altitude. Dix ans plus tard, la plante avait totalement changé d'aspect: plus petite, elle ne présentait plus qu'une seule tige, munie de feuilles plus épaisses et uniquement à la base, et d'un système racinaire plus important.

P.40

ASTROCANNIBALE

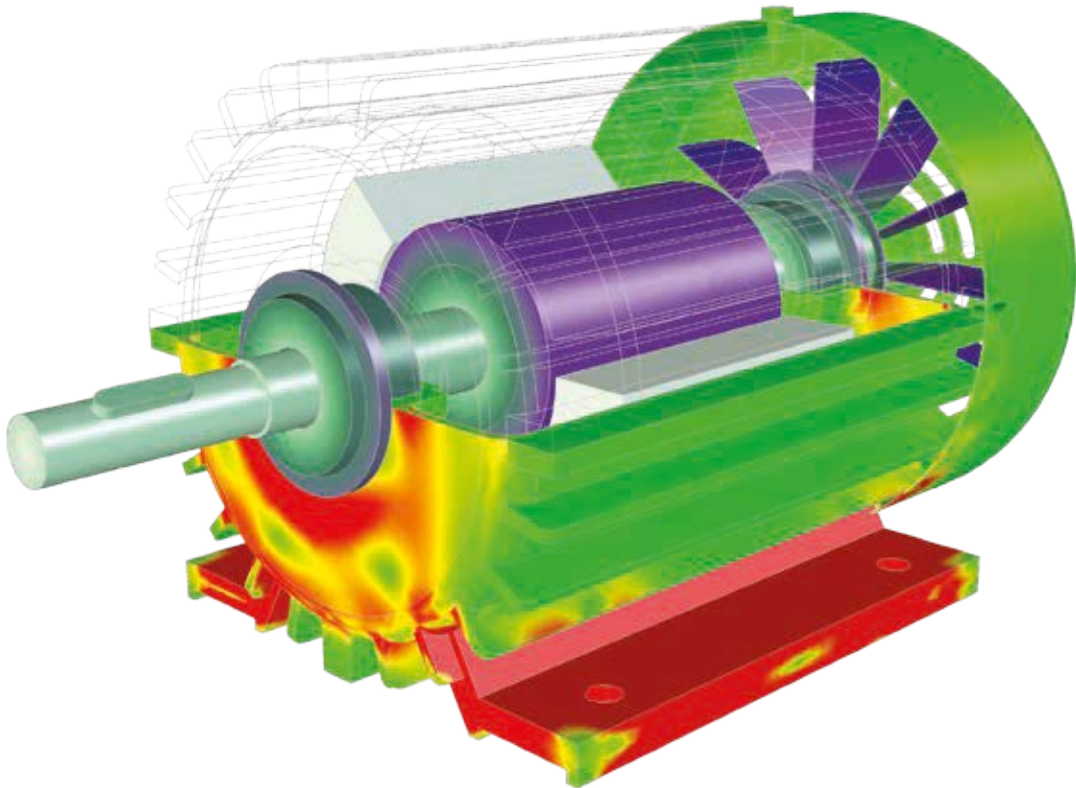
Le satellite Gaia réalise une cartographie précise des étoiles dans la Voie lactée, qui permet de reconstituer l'histoire passée de la Galaxie. On estime ainsi qu'il y a 10 milliards d'années, la Voie lactée a englouti une galaxie quatre fois plus petite qu'elle, nommée depuis Gaia-Enceladus.

P.26

33 %

Ces quinze dernières années en France, si les effectifs globaux des oiseaux forestiers et des oiseaux opportunistes (qu'on rencontre un peu partout, comme le merle noir ou la mésange charbonnière) sont à peu près stables, les populations des campagnes ont, elles, diminué d'un tiers.

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor