



SCIENCE

ÉCOLOGIE

**LES MÉFAITS
DE LA POLLUTION
LUMINEUSE**

HISTOIRE

**LE CANULAR
DE BENJAMIN
FRANKLIN**

NEUROSCIENCES

**L'ÉTONNANT
CERVEAU
DES OISEAUX**AVRIL 2020
N° 510

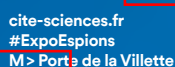
UNE CRISE COSMIQUE

**Controverse autour
de la constante
de Hubble**

15 octobre 2019
— 9 août 2020

en coproduction avec

LE BUREAU DES LEGENDES



En coproduction avec



Le Point



POUR LA
SCIENCE

Owant

Europe 1

Avec l'appui scientifique





**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

ÉLUSIVE EXPANSION COSMIQUE

Dans les années 1927-1929, les travaux du chanoine et astronome belge Georges Lemaître et de l'astronome américain Edwin Hubble ont abouti à la conclusion que l'Univers est en expansion: les galaxies s'éloignent les unes des autres, d'autant plus vite que la distance qui les sépare est grande. Une analogie bien connue, bien sûr grossière, consiste à imaginer les galaxies comme des raisins secs mélangés à de la pâte à brioche, qui représenterait l'espace: la cuisson faisant gonfler la pâte, les raisins s'écartent les uns des autres.

L'expansion de l'Univers est un phénomène dont les équations de la relativité générale d'Einstein rendent très bien compte, moyennant quelques hypothèses raisonnables, ce qui a conduit à la théorie du Big Bang – le modèle standard de la cosmologie d'aujourd'hui. Et dans ce modèle, le taux actuel d'expansion de l'Univers est évidemment un paramètre crucial, nommé « constante de Hubble ».

Quelle est la valeur de cette constante? Derrière la question se cachent de grandes difficultés pour les astronomes, en particulier celles relatives à la mesure des distances... astronomiques. Aussi n'ont-ils pu donner à la constante de Hubble une valeur relativement précise que dans les années 1990: le cosmos se dilate d'environ 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec (unité de distance valant 3,26 millions d'années-lumière).

Les travaux se sont poursuivis pour gagner en précision... et ont récemment abouti à ce que bien des cosmologistes appellent une crise. Car, comme Richard Panek et Frédéric Courbin nous l'expliquent dans ce numéro (voir pages 26 à 34, et 36 à 39), des méthodes de mesure différentes ont donné deux valeurs distinctes, incompatibles même si l'on tient compte des barres d'erreur. Quelle est l'origine de ce grave désaccord? Des défauts dans les instruments ou les observations? Dans les modèles astrophysiques? Dans les modèles cosmologiques? Dans les théories fondamentales? Pour l'heure, l'énigme reste entière. Elle est en tout cas suffisamment stimulante pour susciter de nouvelles approches... ainsi que des frictions bien humaines. ■

SOMMAIRE

N° 510 /
Avril 2020

ACTUALITÉS

P.6

ÉCHOS DES LABOS

- Du contrôle de la mémoire au stress post-traumatique
- Déchets nucléaires: l'épreuve de la corrosion
- Les Africains aussi ont des ancêtres néandertaliens
- Une cible contre la DMLA?
- Comment les ailes de papillons se rafraîchissent
- Un couple d'étoiles appuie la théorie d'Einstein
- L'eau plisse les feuilles des nénuphars
- Autophagie neuronale perturbée
- Des trous dans la cuticule
- New Horizons livre les premiers secrets d'Arrokoth
- FlauBERT parle français

P.18

LES LIVRES DU MOIS

P.20

AGENDA

P.22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

De l'encyclopédie de Diderot à Wikipédia
Gilles Dowek

P.24

QUESTIONS DE CONFIANCE

De la probité avant tout
Virginie Tournay



En couverture :
© Mark Ross Studios

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

GRANDS FORMATS



P.40

STATISTIQUE

LA VALEUR-P : UN PROBLÈME SIGNIFICATIF

Lydia Denworth

Les méthodes statistiques pour jauger la pertinence d'un résultat expérimental sont attaquées de toutes parts. Résisteront-elles?



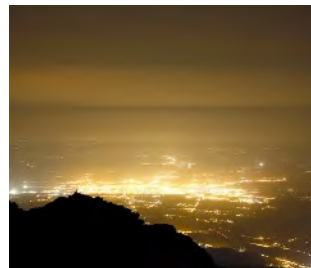
P.48

NEUROSCIENCES

L'ÉTONNANT CERVEAU DES OISEAUX

Onur Güntürkün

Ils savent se reconnaître dans un miroir, se servir d'outils rudimentaires et même en fabriquer. Ils n'ont pourtant qu'une... cervelle d'oiseau! Paradoxe?



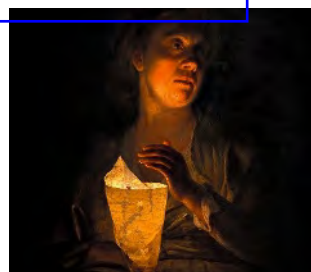
P.58

ÉCOLOGIE

LES MÉFAITS DE LA POLLUTION LUMINEUSE

Emmanuel Desouhant,
Thierry Lengagne
et Nathalie Mondy

Les endroits où l'obscurité de la nuit reste préservée se font de plus en plus rares. Or la lumière artificielle nocturne perturbe de plusieurs façons la vie des animaux. Au point de contribuer à l'érosion générale de la biodiversité.



P.66

HISTOIRE DES SCIENCES

LE CANULAR DE BENJAMIN FRANKLIN

Jacques Gapiillard

Se lever plus tôt l'été pour économiser des bouts de chandelles, c'est ce que proposait une curieuse lettre anonyme en 1784 dans un quotidien parisien. Son auteur n'était autre que Benjamin Franklin, dont les Français ont découvert l'humour à cette occasion...



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



COSMOLOGIE

P.26

LA CRISE COSMIQUE DE LA CONSTANTE DE HUBBLE

Richard Panek

La vitesse d'expansion de l'Univers a fait l'objet de deux mesures aux résultats incompatibles. Une troisième vient de compliquer encore la situation. Chacune semble pourtant fiable. Où est l'erreur?

P.36

CONSTANTE DE HUBBLE : « LA DIVERSITÉ DES MÉTHODES DE MESURE ENRICHT LE DÉBAT »

Entretien avec Frédéric Courbin

Pour sortir de la crise provoquée par les mesures de la constante de Hubble, de nombreux chercheurs développent des méthodes de mesure indépendantes de celles utilisées jusqu'ici. Tour d'horizon.

Cahier partenaire

RÉSILIENCE ET DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE

En partenariat avec

Au centre du numéro



Pages I à XXXII

RENDEZ-VOUS

P.72

LOGIQUE & CALCUL

QUAND

LES MACHINES

FONT DES MATHÉMATIQUES

Jean-Paul Delahaye

Les intelligences artificielles seront-elles un jour capables de produire des théorèmes aussi intéressants que ceux des mathématiciens humains? On en est encore loin, mais les choses avancent peu à peu.



P.78

ART & SCIENCE

La mer...

qu'on voit monter

Loïc Mangin

P.80

IDÉES DE PHYSIQUE

Les petits bateaux

de Marangoni

Jean-Michel Courty

et Édouard Kierlik

P.84

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Les félins, rois de l'hybridation

Hervé Le Guyader

P.89

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des dérivés de l'ail

dans le lait maternel

Hervé This

P.90

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Agenda

P.22 Homo sapiens informaticus

P.24 Questions de confiance

DU CONTRÔLE DE LA MÉMOIRE AU STRESS POST-TRAUMATIQUE

L'attaque terroriste du 13 novembre 2015 à Paris a été un choc pour la population et surtout pour les survivants, dont une partie souffrent de troubles de stress post-traumatique.



Les mécanismes du contrôle de la mémoire, et pas seulement la mémoire, seraient impliqués dans les troubles de stress post-traumatique.

Les attaques terroristes qui ont ciblé le Bataclan et plusieurs autres sites à Paris et à Saint-Denis le 13 novembre 2015 ont profondément marqué les survivants, leurs proches, et plus largement toute la société française. Pour comprendre comment un événement aussi tragique s'inscrit dans la mémoire collective et individuelle, l'Inserm, le CNRS et HESAM Université ont lancé le programme 13-Novembre sous la direction de l'historien Denis Peschanski et du neuropsychologue Francis Eustache. Dans le cadre de ce projet, Pierre Gagnepain,

chercheur à l'Inserm, au centre Cyceron, à Caen, et ses collègues se sont intéressés aux mécanismes cérébraux impliqués dans le stress post-traumatique. Pourquoi certaines personnes développent-elles des symptômes de stress post-traumatique alors que d'autres semblent faire preuve d'une meilleure résilience ?

Le stress post-traumatique se manifeste de diverses façons, avec des symptômes qui évoluent de façon progressive et restent parfois silencieux pendant des mois, voire des années. L'une des manifestations les plus caractéristiques est l'intrusion fréquente et non contrôlée de

«flashes» de souvenirs, sous la forme d'images ou d'odeurs associées au traumatisme vécu. Les victimes revivent ainsi en permanence l'épisode traumatique, ce qui engendre une grande détresse aussi bien émotionnelle que physique.

On associait jusqu'à présent ce trouble au dysfonctionnement de la mémoire: les souvenirs intrusifs persistent à la façon d'un disque rayé qui répète en boucle les mêmes notes. Des analyses par imagerie ont confirmé le rôle de la mémoire dans ce trouble, notamment de l'hippocampe, région du cerveau impliquée dans la formation de la mémoire. Dès lors, les approches thérapeutiques actuelles consistent à essayer de contextualiser ces souvenirs pour les ancrer dans le passé et d'en réduire l'impact; mais pour certains

patients, travailler directement sur ces souvenirs pouvait avoir un effet contre-productif et aggravant.

Pierre Gagnepain et ses collègues ont étudié une autre piste: ce ne serait pas le travail sur le souvenir qui, en soi, aggrave le stress, mais plutôt la défaillance du système cérébral de contrôle, dont l'un des rôles est d'inhiber les souvenirs stressants.

Les chercheurs ont notamment travaillé avec 102 volontaires parmi les personnes qui avaient subi les attentats, dont 55 présentent un trouble de stress post-traumatique. Les chercheurs ont créé des souvenirs intrusifs (neutres et sans lien avec les attentats) chez tous les participants et ils ont analysé leur capacité à supprimer ces souvenirs. Les personnes étaient d'abord exposées à des associations d'un mot et d'une image sans liens. Ainsi, quand elles lisaient un mot, elles pensaient de façon automatique à l'image associée. Ensuite, les chercheurs leur ont demandé d'essayer de ne plus penser à l'image quand elles voyaient les mots associés.

Chez les personnes ne souffrant pas de stress post-traumatique, l'imagerie IRM fonctionnelle a révélé une forte connexion entre le cortex préfrontal (région responsable de l'inhibition, notamment de la mémoire) et les structures associées à la mémoire (comme l'hippocampe) lors du contrôle des souvenirs intrusifs. Dans ce cas, le mécanisme de contrôle intervient sur l'activité de l'hippocampe et bloque l'activation des souvenirs intrusifs.

Chez les sujets souffrant de stress post-traumatique, ces connexions sont quasiment absentes et l'activité des régions de la mémoire n'est pas régulée. Il reste cependant à déterminer si ce dérèglement du contrôle de la mémoire est lié à un facteur préexistant ou s'il est une séquelle de l'épisode traumatique vécu.

En montrant l'implication du contrôle de la mémoire dans le stress post-traumatique, Pierre Gagnepain et ses collègues ouvrent une piste thérapeutique intéressante qui viserait à renforcer le mécanisme de contrôle de la mémoire sans avoir à toucher aux souvenirs stressants. ■

SEAN BAILLY

A. Mary et al., *Science*, vol. 367, eay8477, 2020

Déchets nucléaires : l'épreuve de la corrosion

Une équipe américaine a testé en conditions réelles les stratégies de conditionnement de déchets radioactifs. Elle a constaté des effets de corrosion sur les colis vitrifiés. François Besnus, directeur de l'environnement à l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), met en perspective ce résultat.

Propos recueillis par Sean BAILLY



FRANÇOIS BESNUS
directeur de
l'environnement à l'IRSN

matériaux dans un environnement spécifique.

Quels types de déchets sont concernés par cette étude ?

Lorsque le combustible d'une centrale nucléaire est usé, il est retraité et dissous dans une solution chimique. On récupère l'uranium et le plutonium, qui sont recyclés et réutilisés. Le reste de la solution contient des produits de fission, hautement radioactifs, qui ne peuvent pas être revalorisés. Il est mélangé à de la silice dans un creuset pour former un verre. Les éléments radioactifs sont alors piégés dans la matrice vitreuse, et le tout est coulé dans une enveloppe en inox. La période radioactive de ces déchets est de l'ordre de la centaine de milliers d'années. À terme, en France, tous ces déchets seront stockés dans la Meuse, à 500 mètres sous la surface si l'installation Cigéo est autorisée.

Que savait-on du vieillissement des déchets vitrifiés jusqu'à présent ?

Les processus en jeu sont bien connus : l'acier de l'enveloppe va se corroder en présence d'eau. Un phénomène dit de « piquuration » se produit et conduit à des conditions localement très acides. Et les milieux très acides déstabilisent la matrice vitreuse, qui se dissout.

L'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) mène depuis longtemps un programme sur l'étude de la dissolution du verre dans un contexte de stockage. Ici, Gerald Frankel, de l'université d'État de l'Ohio, et ses collègues ont étudié l'influence locale de la corrosion de l'inox sur la dégradation du matériau vitrifié dans des conditions représentatives du projet de stockage américain Yucca Mountain. Les chercheurs ont observé des réactions complexes de corrosion et de dissolution du verre. Les processus étaient déjà connus, mais il était intéressant de voir le comportement à l'interface de ces

L'eau joue un rôle essentiel dans la dissolution, mais les sites de stockage ne sont-ils pas secs ?

Le site américain Yucca Mountain se trouve dans une région très aride. Mais Gerald Frankel et ses collègues ont considéré qu'on ne peut pas prévoir quelle sera la situation climatique de la région dans, par exemple, mille ans. Ils ont donc étudié ce qui se passe en présence d'eau, afin de voir l'incidence de ce phénomène sur la sûreté du stockage.

En France, la stratégie est très différente. On sait que le site prévu est saturé en eau. Les interactions avec l'eau ont déjà été prises en compte dans la démonstration de sûreté du stockage, même si elles n'ont pas été modélisées comme dans la nouvelle étude. Puisqu'il existe des incertitudes sur la vitesse de dissolution, plusieurs scénarios ont été considérés. C'est en connaissance de ces incertitudes que le milieu géologique étudié dans le laboratoire souterrain de Bure a été choisi. Les déchets seraient stockés dans une couche d'argile épaisse d'une centaine de mètres. Du fait de sa très faible perméabilité, la migration des éléments radioactifs libérés devrait être assez lente pour ne pas produire de pollution notable.

En matière de stockage de très longue durée de déchets radioactifs, il est impossible de tout savoir. Il faut essayer de comprendre au mieux les différents paramètres en jeu, comme le vieillissement des matériaux, la vitesse des réactions, etc., mais il existe toujours une part d'incertitude. Le principe de base est donc de gérer cette incertitude, d'être le plus prudent possible et de mettre en place des relais pour que, si un élément du système se révèle défaillant, un autre puisse garantir l'efficacité du stockage. Ce qui compte, c'est de mettre en place un système robuste par rapport à toutes les incertitudes présentes. ■

X. Guo et al., *Nature Materials*, vol. 19, pp. 310-316, 2020

PALÉOGÉNÉTIQUE

LES AFRICAINS AUSSI ONT DES ANCÊTRES NÉANDERTALIENS

Une nouvelle méthode d'identification de l'ADN néandertalien dans les génomes contemporains change notre vision de l'histoire du métissage néandertalien-sapiens : les Africains aussi descendraient d'*Homo neanderthalensis*.

L'homme de Néandertal ayant évolué en Eurasie, on pensait les Africains subsahariens dénués de gènes néandertaliens. Mais l'équipe de Joshua Akey, de l'université de Princeton, vient de montrer que ceux du nord de l'Afrique subsaharienne ont une proportion non négligeable d'ADN néandertalien.

La nouvelle méthode utilisée par les chercheurs, nommée IBDmix, vise à comparer des génomes modernes avec un génome ancien de référence (ici le génome d'un Néandertalien) et à en déduire quels haplotypes (groupes d'allèles, c'est-à-dire de variants de gènes, transmis ensemble) proviennent d'un ancêtre commun. Plus précisément, pour un génome moderne donné, elle consiste ici à déterminer, au moyen d'une analyse statistique élaborée, s'il est plus vraisemblable que chaque haplotype commun au génome néandertalien ait été transmis depuis un ancêtre commun plutôt que recomposé par la reproduction et les éventuelles mutations survenues au fil des générations.

L'intérêt de cette méthode est que, contrairement aux autres, elle ne nécessite pas de comparaison avec un échantillon de génomes modernes sans gènes néandertaliens. Or les précédentes études s'appuyaient sur des échantillons issus en général de l'ethnie Yoruba, d'Afrique de l'Ouest, supposée exempte de gènes néandertaliens. Avec leur méthode, Joshua Akey et ses collègues ont montré que les Yorubas ont en moyenne 0,5% d'ADN néandertalien, donc que l'échantillon yoruba est biaisé...

Au total, les chercheurs ont analysé 2504 génomes modernes issus du monde entier. Ils ont ainsi identifié en moyenne 17 millions de paires de bases d'ADN néandertalien chez les Africains subsahariens de l'échantillon (sur 3200 millions de paires de bases dans le génome humain), ce qui suggère que les Subsahariens ont en moyenne 0,5% d'ADN néandertalien. Point remarquable, cette valeur est similaire chez les Nord-Africains, donc de part et d'autre du Sahara.

Cet ADN néandertalien provient-il d'une migration en Afrique de Néandertaliens ou d'Eurasiens qui se seraient hybridés avec des Néandertaliens? Après avoir testé ces deux



D'anciens flux de gènes entre l'Eurasie et l'Afrique expliquent que les Africains aussi descendent en partie d'*Homo neanderthalensis*.

hypothèses à l'aide de modèles démographiques, les chercheurs penchent pour la seconde. D'autant qu'ils ont par ailleurs montré qu'une partie de l'ADN néandertalien des Africains résulte d'un métissage très ancien d'*Homo neanderthalensis* avec *H. sapiens* d'Eurasie, en accord avec l'hybridation très ancienne que l'équipe de Cosimo Posth, de l'institut Max-Planck de Tübingen, en Allemagne, avait déjà pointée en 2017.

Enfin, Joshua Akey et ses collègues ont montré que la proportion moyenne d'ADN néandertalien des Extrême-Orientaux est comparable à celle des Européens (1,7%), alors que les études précédentes aboutissaient à une proportion plus élevée, qui d'ailleurs posait des problèmes d'interprétation. Il semble donc que tous les humains actuels aient des ancêtres néandertaliens... Un résultat qui reste à confirmer, car les génomes africains étudiés proviennent tous du nord de l'Afrique subsaharienne. Et si les Sans, chasseurs-cueilleurs sud-africains, qui, *a priori*, ont toujours vécu loin de l'Eurasie, étaient dépourvus d'ADN néandertalien? Affaire à suivre. ■

FRANÇOIS SAVATIER

L. Chen et al., *Cell*, vol. 180(4), pp. 603-818, 2020

UNE EXPLOSION
RECORD

Le ciel est constellé d'événements très lumineux, comme les supernovæ. Récemment, c'est une explosion dans un noyau de galaxie, d'une intensité inédite, dont Simona Giacintucci, du laboratoire américain de recherche navale, et ses collègues ont repéré les traces. Cette bouffée d'ondes radio a en effet creusé un « trou » dans le plasma entourant cette zone. C'est l'explosion la plus puissante jamais découverte ; elle a libéré 10^{20} fois l'énergie émise par le Soleil en un an.

The Astrophysical Journal,
27 février 2020

TABAGISME
TRES INDIRECT

Le tabagisme passif tue 600 000 personnes dans le monde chaque année. Mais la fumée de cigarette, cancérigène, pollue aussi plus indirectement. Roger Sheu, de l'université Yale, aux États-Unis, et ses collègues ont mesuré la concentration de plusieurs substances toxiques liées à la cigarette dans une salle de cinéma. Ils ont découvert que les fumeurs transportent, sur leur peau et leurs vêtements, des molécules qui s'évaporent dans l'air ; les autres personnes présentes sont alors exposées à une pollution importante.

Science Advances, 4 mars 2020

L'ODORAT TROMPÉ
DES TORTUES

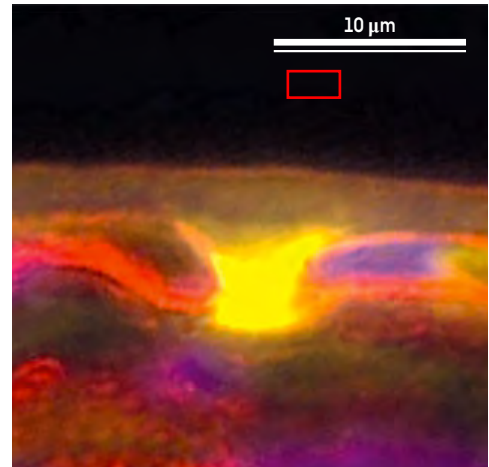
Les déchets humains dans les océans menacent les écosystèmes. Par exemple, les tortues marines s'étouffent avec des sacs en plastique qu'elles prennent pour de la nourriture. On pensait que la ressemblance visuelle avec les méduses était en cause, mais d'après Joseph Pfaller, de l'université de Floride, et ses collègues, la confusion serait peut-être aussi olfactive : certaines tortues semblent attirées par les odeurs émises par des plastiques couverts d'algues et de bactéries !

Current Biology, 9 mars 2020

UNE CIBLE CONTRE
LA DMLA?

A partir de 65 ans, la vision centrale d'une personne sur cinq se dégrade progressivement à cause de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), maladie de la rétine qui existe sous deux formes : une forme sèche pour laquelle il n'existe aucun traitement, et une forme humide dont on peut ralentir les effets. Dans les pays industrialisés, la DMLA constitue un problème majeur de santé publique et on estime que le nombre de cas augmentera d'environ 50% d'ici à vingt ans. En cherchant une cible thérapeutique, Valentina Cipriani, de l'université Queen Mary, à Londres, et une équipe internationale ont constaté une forte expression de la protéine FHR-4 dans le sang de patients atteints aussi bien de la forme humide que de la forme sèche de la DMLA. « C'est la première fois que l'on met en évidence dans le sang un marqueur du risque de développer une DMLA », indique Isabelle Audo, chercheuse à l'Institut de la vision, à Paris.

La protéine FHR-4 régule le système dit « du complément », qui fait partie du système immunitaire et joue un rôle dans l'inflammation. Des études précédentes avaient déjà montré que l'activation de ce système du complément est impliquée dans le développement de la DMLA. Ici, Valentina Cipriani et ses collègues ont



La protéine FHR-4 (en jaune) s'accumule dans les drusen, des dépôts se formant avec l'âge dans la rétine de l'œil. Elle serait impliquée dans le développement de la DMLA.

observé chez les patients une accumulation de FHR-4 dans les drusen, des dépôts qui se forment avec l'âge dans les couches profondes de la rétine et la choroïde, selon un mécanisme encore mal connu. Dans ces drusen, FHR-4 entre en compétition avec des éléments qui jouent normalement un rôle de frein au système du complément. ■

NOËLLE GUILLON

V. Cipriani et al., *Nature Communications*,
vol. 11, article 778, 2020

PHYSIQUE

UN MILIEU
GRANULAIRE LIQUIDE

Dans les déserts chauds, le vent crée des dunes relativement stables, dont l'angle avec l'horizontale avoisine 30 degrés. Ces tas se forment grâce à la nature granulaire du sable, qui lui confère des propriétés physiques intermédiaires entre celles d'un solide – indéformable – et celles d'un liquide. Les grains de sable ne sont soumis qu'à la gravitation et aux frottements solides. Les autres forces, comme celles dues à l'agitation thermique, sont négligeables à cette échelle. Mais qu'en est-il avec des grains beaucoup plus petits ? Antoine Bérut et ses collègues, de l'université d'Aix-Marseille, ont formé des tas de billes microscopiques. Ils ont observé que ces amas, à la manière d'un liquide, ne cessaient jamais de s'étaler, bien que de plus en plus lentement. Comme l'a confirmé le modèle théorique



Les grains de sable forment des dunes, mais des amas de billes mille fois plus petites s'étalent comme un liquide.

élaboré par les chercheurs, c'est en raison de l'agitation thermique, dont l'influence relative par rapport aux autres forces est d'autant plus grande que les particules sont petites. ■

LUCAS GIERCZAK

A. Bérut et al., *Physical Review Letters*,
vol. 123, article 248005, 2019

BIOPHYSIQUE

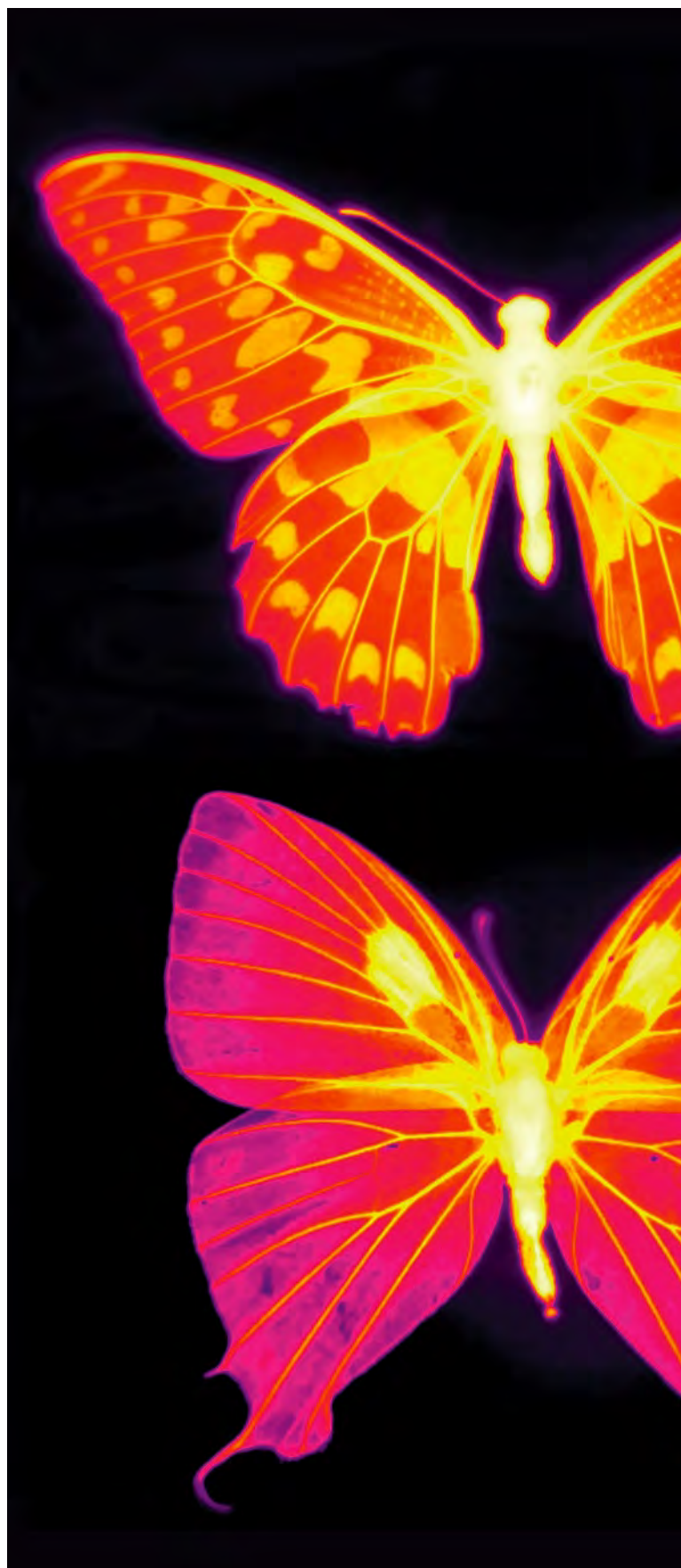
COMMENT LES AILES DE PAPILLONS SE RAFRAÎCHISSENT

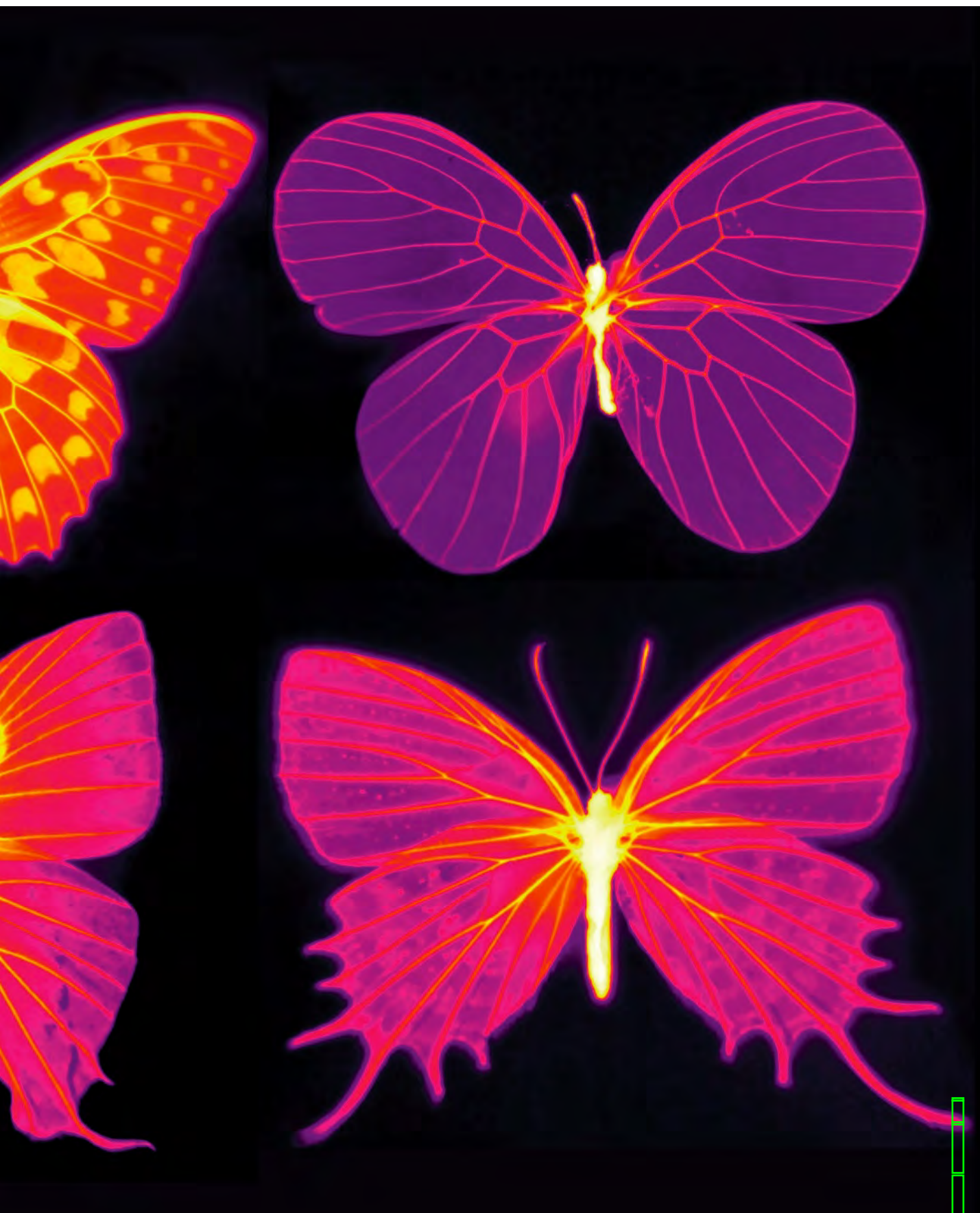
Les ailes des papillons fascinent. Leurs couleurs et leurs motifs remplissent de nombreux rôles, tels que le camouflage ou la parade nuptiale. Mais les entomologistes savent aussi que les ailes sont des structures vivantes qui ne servent pas seulement à voler et envoyer des signaux visuels, et qu'elles régulent leur propre température. Cheng-Chia Tsai, de l'université Columbia, aux États-Unis, et ses collègues viennent d'étudier, chez différentes espèces, les structures spécifiques qui, couplées à des adaptations comportementales, permettent aux ailes des papillons d'éviter la surchauffe.

Exposées au soleil, les ailes d'un papillon chauffent très vite en raison de leur grande surface et faible volume. D'après les mesures des chercheurs, les ailes passent en moyenne de 25 °C (la température ambiante) à environ 42 °C en moins de huit secondes ! Mais Cheng-Chia Tsai et ses collègues ont remarqué que les zones vivantes des ailes (veines et organes émetteurs de phéromones) étaient plus froides – jusqu'à 15 °C de moins que les plus chaudes. Sur l'image ci-contre, les zones claires correspondent à une grande capacité de rayonnement thermique, et donc à une plus faible température. Cette différence est rendue possible par des nanostructures particulières présentes à la surface de ces zones, qui aident à évacuer efficacement la chaleur. En outre, les papillons ont des réflexes comportementaux qui limitent la surchauffe : ils savent aligner leurs ailes au maximum avec la direction de la lumière incidente, ce qui réduit l'apport d'énergie thermique. ■

L. G.

C.-C. Tsai et al., *Nature Communications*,
vol. 11, article 551, 2020





© Nanfang Yu et Cheng-Chia Tsai

ASTROPHYSIQUE

UN COUPLE D'ÉTOILES APPUIE LA THÉORIE D'EINSTEIN

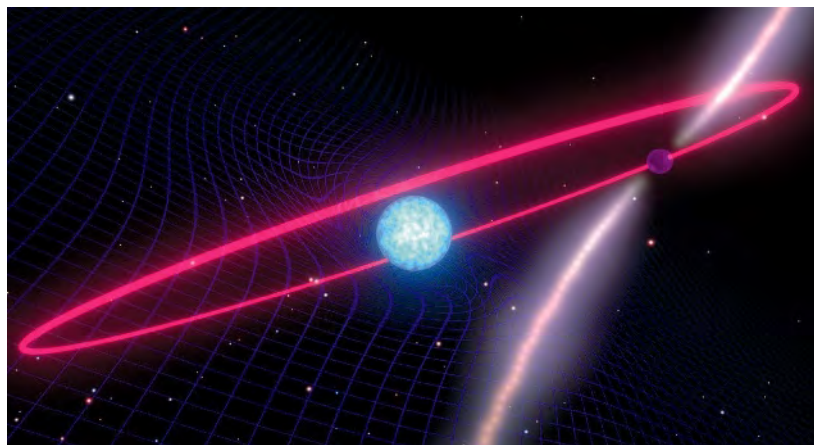
En observant la trajectoire d'une étoile à neutrons formant un couple avec une naine blanche, une équipe vient de mesurer un phénomène relativiste extrêmement faible.

Nombreuses sont les confirmations expérimentales de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein: déviation des rayons lumineux par des objets massifs, ondes gravitationnelles, etc. Selon cette théorie, toute masse déforme l'espace-temps autour d'elle. Elle prédit notamment que la rotation rapide d'un corps massif sur lui-même déforme également l'espace-temps, l'«entraînant» avec lui.

Nommé «effet Lense-Thirring», ce phénomène relativiste est d'amplitude très faible. Il vient toutefois d'être mesuré expérimentalement par Vivek Krishnan, de l'université technologique Swinburne, à Melbourne, en Australie, et ses collègues, grâce à l'observation d'un couple formé d'une étoile à neutrons et d'une naine blanche.

L'effet Lense-Thirring est d'autant plus important que l'objet en rotation est massif et que sa rotation est rapide. Il se manifeste notamment lorsqu'un corps tourne autour d'un autre corps massif en rotation sur lui-même – par exemple un satellite autour de la Terre. Les équations d'Einstein prédisent dans ce cas que le satellite subit une «précession»: au cours de sa révolution autour de la Terre, l'axe perpendiculaire à son plan de révolution tourne en décrivant un cône autour d'une direction moyenne. Bien que l'effet Lense-Thirring soit extrêmement faible, donc difficile à détecter, la Nasa a annoncé en 2011 l'avoir mis en évidence à l'aide du satellite *Gravity Probe B*, en orbite autour de la Terre.

Les astrophysiciens ont aussi eu l'idée de tester l'effet Lense-Thirring dans des configurations où il est plus intense: lorsque la masse de l'objet en rotation est énorme, et cette rotation rapide. Ils se sont donc tournés vers PSR J1141-6545, un couple d'étoiles formé d'une naine blanche massive et d'un pulsar (une étoile à neutrons qui émet des ondes radio de façon périodique). La régularité des émissions des pulsars autorise des mesures extrêmement précises. En outre, la naine



Vue d'artiste de PSR J1141-6545, composé d'une naine blanche (en bleu clair) et d'un pulsar (en violet), dont les signaux radio réguliers (en blanc) permettent de suivre la trajectoire.

10⁻⁵ DEGRÉ

LE SATELLITE *GRAVITY PROBE B* DE LA NASA, LANCÉ EN 2004, A MESURÉ UNE PRÉCESSION AUTOUR DE LA TERRE CONFORME À LA THÉORIE D'EINSTEIN, EXTRÊMEMENT FAIBLE: SON AXE DE RÉVOLUTION SE DÉPLACE DE MOINS DE 10⁻⁵ DEGRÉ PAR AN. À CE RYTHME, UN TOUR COMPLET PREND ENVIRON 40 MILLIONS D'ANNÉES.

blanche, très dense (environ une masse solaire pour un diamètre inférieur à celui de la Terre) tourne très vite sur elle-même – en quelques minutes. L'effet Lense-Thirring qu'elle produit est donc beaucoup plus fort que celui de la Terre. Le couple PSR J1141-6545 offre une configuration idéale, et c'est ainsi le déplacement de l'axe de l'orbite de l'étoile à neutrons que Vivek Krishnan et ses collègues ont mesuré.

Pour ce faire, les chercheurs ont exploité les données collectées durant vingt ans, depuis 2000, par les radiotélescopes des observatoires de Parkes et de Molonglo, en Australie. Ils ont reconstitué la trajectoire de l'étoile à neutrons et ont mesuré les variations de son orbite au fil du temps.

Ils ont ainsi montré, comme prédit par la théorie, que l'orbite (presque circulaire) de l'étoile à neutrons s'était décalée d'environ 150 kilomètres en vingt ans. Une mesure qui confirme la théorie d'Einstein et qui a aussi permis d'en savoir plus sur la formation du couple d'étoiles. ■

L. G.

V. V. Krishnan et al., *Science*, vol. 367, pp. 577-580, 2020

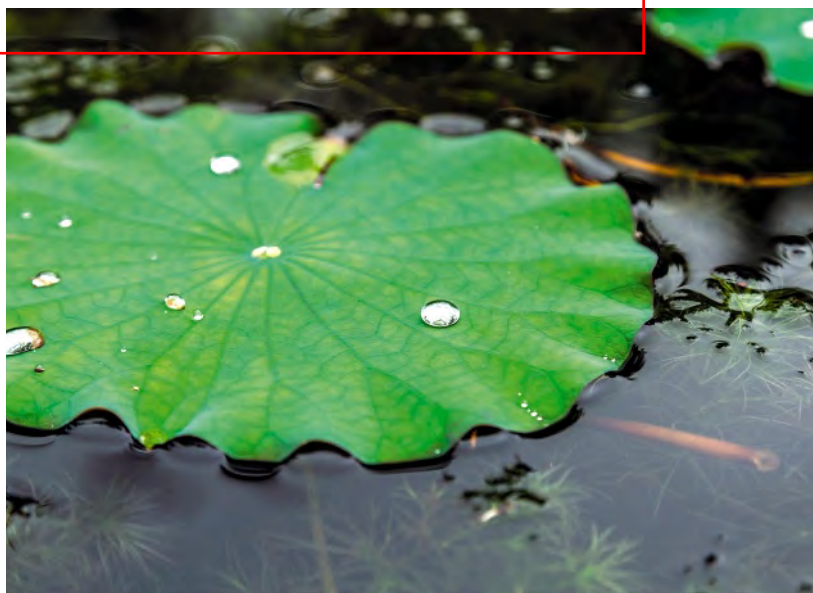
LE TOMBEAU DE ROMULUS ?

L'équipe d'Alfonsina Russo, directrice du parc archéologique du Colisée, à Rome, vient de retrouver dans le forum romain un sanctuaire dédié à Romulus. Les chercheurs le datent de la fin du VI^e siècle avant notre ère (d'après la profondeur de son sol, qui correspond à celle d'autres fragments de la surface du forum de la même époque). Ayant la forme d'une fausse tombe contenant un sarcophage symbolique (vide) de 1,4 mètre de long et un autel rond en tuf volcanique du Capitole, il se trouve à quelques mètres de l'emplacement d'une stèle taillée dans la même pierre et mise au jour en 1899 – le *Lapis niger*. Or d'après Festus, un auteur du IV^e siècle avant notre ère, cette stèle « marque un lieu de culte : la tombe de Romulus »... ■

F.S.

Communiqué du parc archéologique du Colisée, 21 février 2020, <https://bit.ly/32TGyLn>

L'EAU PLISSE LES FEUILLES DES NÉNUPHARS



La taille des ondulations des feuilles flottantes est régie par une compétition entre plusieurs forces. Cet équilibre est différent pour les feuilles aériennes, qui ondulent alors moins.

ÉCOLOGIE

ALBATROS MOUCHARDS

Henri Weimerskirch, du Centre d'études biologiques de Chizé, et ses collègues se sont inspirés des performances des albatros pour monter l'opération *Ocean Sentinel*. Les chercheurs ont équipé ces oiseaux de petits capteurs sensibles aux radars des bateaux afin d'obtenir en temps réel les localisations de bateaux se trouvant dans les eaux internationales et dans les zones économiques exclusives – des zones difficiles à surveiller et contrôler. Or ce contrôle s'impose pour mettre en application les mesures de conservation et de protection de la faune marine, en particulier contre la surpêche. Dans le sud de l'océan Indien, autour des îles Crozet, Kerguelen et Amsterdam, les albatros ont ainsi permis de repérer des navires militaires, des navires légaux dont la balise était temporairement éteinte, mais aussi des bateaux de pêche présents illégalement. ■

CAPUCINE MÉJANÈS

H. Weimerskirch *et al.*, *PNAS*, vol. 117 (6), pp. 3006-3014, 2020

Grâce à une hormone qui a pour effet d'augmenter la taille des cellules et qui se concentre dans la partie ombragée de la tige, les tournesols maximisent l'exposition de leurs feuilles à la lumière du soleil en tournant au cours de la journée : le gonflement des cellules engendre une torsion qui est à l'origine de la rotation de la tige. Un autre exemple végétal où des contraintes mécaniques agissent est la forme des nénuphars, dont les feuilles se courbent ou présentent des ondulations « en rayons » sur leur bord. Fan Xu, de l'université Fudan, en Chine, et ses collègues viennent d'expliquer par un nouveau modèle comment le contact de l'eau influe sur ces motifs.

Tout part d'une observation : les feuilles de nénuphars flottant à la surface de l'eau ont la forme d'un disque comportant de petites ondulations sur ses bords, tandis que celles portées par une tige, à l'air libre, présentent seulement quelques grands « lobes ». Cette différenciation n'est pas d'origine génétique : elle s'opère même entre les feuilles d'une même plante. Postulant que ce sont les contraintes mécaniques spécifiques au contact avec l'eau qui modifient la croissance des tissus, Fan Xu et ses collègues ont modifié des modèles datant des années 1990 et décrivant les déformations subies par un tissu souple et élastique qui s'étend par division cellulaire. Grâce au nouveau système d'équations obtenu, ces physiciens ont simulé la forme que prend une feuille de nénuphar en l'air ou sur l'eau, et ont retrouvé les différences observées dans la nature. D'après eux, ce phénomène s'explique par un compromis entre le poids de l'eau collée à la face inférieure des feuilles – qui a tendance à resserrer les ondulations – et l'élasticité limitée des feuilles. ■

L. G.

F. Xu *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124, article 038003, 2020

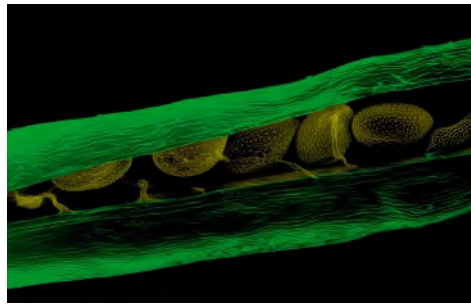
BIOLOGIE VÉGÉTALE

EN BREF

DES TROUS DANS LA CUTICULE

Dès le stade de la graine, les plantes terrestres sont exposées à un risque de déshydratation. La cuticule, une couche protectrice qui recouvre la graine et toute la plante, limite ce risque. Mais pour être efficace, cette pellicule ne doit pas présenter de trous. Chez l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), certaines mutations engendrent une malformation de la cuticule embryonnaire, qui contient alors des trous : la graine succombe à la déshydratation. Gwyneth Ingram, de l'université de Lyon et du CNRS, et ses collègues révèlent qu'un dialogue moléculaire complexe, entre l'embryon et le tissu qui l'entoure dans la graine, protège l'intégrité de la cuticule des plantes saines.

En temps normal, l'embryon émet un peptide en guise de messenger chimique. Celui-ci est inactif tant qu'il demeure au sein de l'embryon et il n'est activé que par une protéine présente uniquement dans l'albumen, le tissu entourant l'embryon et la cuticule dans la



Cosse d'arabette des dames, vue au microscope électronique, contenant des graines.

graine. Ainsi, si la cuticule est trouée, le peptide peut rejoindre l'albumen, s'y activer, puis régénérer l'embryon où sa nouvelle forme est reconnue par un récepteur enzymatique spécifique. Cette reconnaissance déclenche une réponse moléculaire qui permet la fermeture des trous. Une fois l'intégrité de la couche imperméable restaurée, le peptide ne peut plus atteindre l'albumen et ne peut donc plus être activé ; le dialogue moléculaire est terminé. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

N. M. Doll et al., *Science*, vol. 367, pp. 431-435, 2020

ANTIDÉCALAGE DE LAMB

Notamment pour comprendre pourquoi le cosmos contient si peu d'antimatière, les physiciens comparent les propriétés de cette dernière à celles de la matière. Au Cern, près de Genève, la collaboration Alpha a mesuré des niveaux d'énergie d'atomes d'antihydrogène (un antiproton lié à un positron) piégés dans un champ magnétique. En provoquant par laser des transitions atomiques, les chercheurs ont mesuré l'écart d'énergie entre les deux premiers états excités et l'état fondamental. Ils en ont déduit le décalage de Lamb, c'est-à-dire la différence d'énergie entre ces deux premiers niveaux excités. Résultat : sa valeur est la même (à 11 % près) pour l'antihydrogène et l'hydrogène.

M. Ahmadi et al., *Nature*, 2020



CNRS FORMATION ENTREPRISES

Organisme de formation continue

260 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche
pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens

Domaines de formation

Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, géographie, sociologie, cognition... et plus encore

+ de 1600 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr

cfe.contact@cnrs.fr

Twitter @CNRS_CFE LinkedIn

TOBA N'A PAS ARRÊTÉ
HOMO SAPIENS

Sur le site de Dhaba, en Inde centrale, l'équipe de Chris Clarkson, de l'université du Queensland, en Australie, a mis au jour une industrie lithique antérieure à l'éruption majeure du Toba, il y a 74 000 ans, et qui a duré jusqu'il y a 48 000 ans. Pas de doute : *Homo sapiens*, qui s'était déjà répandu hors d'Afrique il y a quelque 100 000 ans, a survécu au cataclysme du Toba et a poursuivi son expansion en Eurasie du Sud.

Nature Communications, 25/2/2020

DES PHAGES GÉANTS

Les bacteriophages, virus infectant des bactéries, ont d'ordinaire de petits génomes. Mais en séquencant l'ADN trouvé dans divers écosystèmes, Basem Al-Shayeb, de l'université de Californie à Berkeley, et des collègues ont trouvé des centaines de génomes de phages de taille supérieure à 200 kilobases. Les ADN étudiés provenant des océans, des lacs, des sédiments, des sols et de l'environnement bâti, les chercheurs supputent que des phages, géants ou pas, vivent dans tous les écosystèmes de la Terre.

Nature, 12 février 2020

AMPHIBIENS
FLUORESCENTS

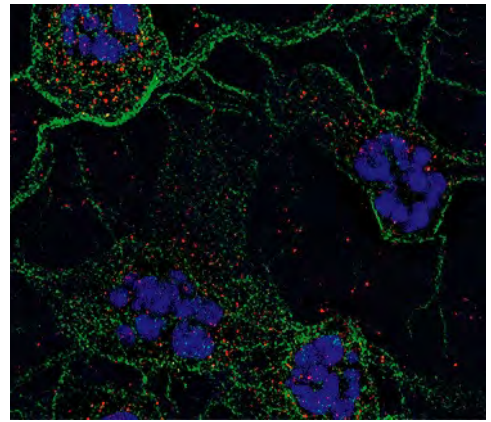
On n'avait observé la biofluorescence que chez une seule espèce de salamandre et trois espèces de grenouille. Jennifer Lamb et Matthew Davis, de l'université d'État de Saint-Cloud, dans le Minnesota, ont soumis des individus de 32 espèces d'amphibiens à une lumière bleue ou ultraviolette et constaté que tous étaient fluorescents. Les motifs d'émission diffèrent d'une espèce à l'autre, allant de taches et rayures à une fluorescence de tout le corps.

Scientific Reports, 27 février 2020

AUTOPHAGIE
NEURONALE
PERTURBÉE

La structure la plus courante pour la molécule d'ADN est la double hélice, mais ce n'est pas la seule : il arrive qu'elle présente la forme de quadruples hélices, les quadruplexes d'ADN ou G-quadruplexes. David Monchaud, chimiste à l'Institut de chimie moléculaire de l'université de Dijon-Bourgogne, et ses collègues viennent de montrer que ces quadruplexes, en perturbant l'autophagie neuronale (le mécanisme de nettoyage et de recyclage des déchets cellulaires), seraient impliqués dans le vieillissement des neurones.

Les chercheurs ont observé que les quadruplexes sont quasi indétectables dans les cerveaux de souris jeunes, mais bien présents dans les cerveaux de souris âgées. « Une hypothèse est que les protéines qui contrecarrent la formation des quadruplexes perdent en efficacité avec le temps », précise David Monchaud. Dès lors, l'expression d'un gène comme *Atg7*, important pour l'autophagie et porteur de quadruplexes chez les souris âgées, pourrait s'en trouver affectée. Les protéines impliquées dans l'autophagie ne seraient plus produites et l'efficacité de ce mécanisme de nettoyage diminuerait donc au cours du temps. Conséquence : des protéines défectueuses et indésirables



Neurones en culture (en bleu, le noyau, en vert le cytoplasme) avec les quadruplexes visualisés par immunodétection (en rouge).

s'accumulent alors dans les neurones, un phénomène qui entraîne parfois l'apparition de maladies neurodégénératives. Et en effet, les chercheurs ont montré que des souris traitées avec des molécules (des ligands) qui stabilisent les quadruplexes présentent des déficits de mémoire et des troubles neuronaux. Or de tels ligands sont aussi utilisés dans des traitements antitumoraux pour perturber la division cellulaire. Une stratégie à revoir ? ■

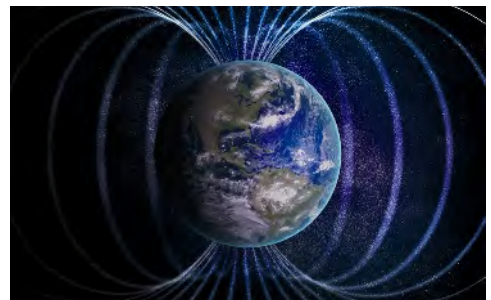
ALINE GERSTNER

J. F. Moruno-Manchon *et al.*, *eLife*, vol. 9, article e52283, 2020

GÉOSCIENCES

UN VIEUX CHAMP
MAGNÉTIQUE

Le champ magnétique de la Terre joue un rôle de bouclier protecteur contre le vent solaire, mais son histoire primordiale reste mal connue. En 2010, l'équipe de John Tarduno, de l'université de Rochester, aux États-Unis, avait montré qu'il était déjà actif il y a 3,45 milliards d'années. Une nouvelle équipe, également dirigée par John Tarduno, vient de relever cet âge. Pour ce faire, les chercheurs ont analysé des échantillons de roches très anciens et bien conservés, des zircons trouvés en Australie et remontant jusqu'à 4,39 milliards d'années. Ces roches contiennent des cristaux de magnétite, qui ont enregistré la direction du champ magnétique terrestre au moment de leur cristallisation, acquérant ainsi une « aimantation rémanente » mesurable aujourd'hui. John Tarduno et ses collègues



L'aimantation rémanente des roches anciennes renseigne sur le champ géomagnétique à l'époque de leur solidification.

ont ainsi mis en évidence la présence d'un champ magnétique déjà important il y a 4,2 milliards d'années : environ 10 microteslas, contre 25 à 65 microteslas aujourd'hui selon la région du globe. ■

L. G.

J. A. Tarduno *et al.*, *PNAS*, vol. 117(5), pp. 2309-2318, 2020

PLANÉTOLOGIE

NEW HORIZONS LIVRE LES PREMIERS SECRETS D'ARROKOTH

La sonde spatiale *New Horizons* vient de survoler Arrokoth, dans la ceinture de Kuiper. Les données recueillies éclairent son histoire et le scénario de sa formation.

En 1930, l'astronome américain Clyde Tombaugh a découvert un corps en orbite autour du Soleil et aux confins du Système solaire: Pluton. Classé dans la famille des planètes naines depuis 2006, ce corps fait partie de la ceinture de Kuiper, un anneau de débris situé au-delà de l'orbite de Neptune, à entre 30 et 55 fois la distance Soleil-Terre. Cet anneau est composé d'objets qui datent, pour beaucoup, de la période de formation des planètes. L'un d'eux, Arrokoth, découvert en 2014 grâce au télescope spatial *Hubble*, a retenu l'attention des scientifiques notamment en raison de sa forme étonnante. La Nasa a profité du passage de sa sonde *New Horizons* près de Pluton et de ses satellites, en juillet 2015, pour en reconfigurer la trajectoire afin de survoler Arrokoth, situé à environ 6,5 milliards de kilomètres de la Terre – trop loin pour des observations détaillées depuis le sol. Des astrophysiciens viennent, dans trois études, de préciser l'histoire, la géologie et la composition d'Arrokoth grâce aux données fournies par la sonde.

La forme d'Arrokoth, tout d'abord, est surprenante: deux lobes approximativement sphériques reliés par un cou plus étroit. John Spencer, de l'institut de recherche du Sud-Ouest, aux États-Unis, et ses collègues en ont précisé la taille (20 et 15 kilomètres respectivement) et les caractéristiques géologiques. La sonde s'est en outre approchée assez près d'Arrokoth – 3500 kilomètres – pour distinguer clairement des cratères à sa surface, mesurant jusqu'à 7 kilomètres de diamètre. Or, comme Arrokoth est très peu sujet à l'érosion, ses cratères remontent probablement à sa formation. Les chercheurs ont confirmé que leur nombre est compatible avec un âge de 4 milliards d'années pour Arrokoth. Ces observations appuient l'hypothèse d'une formation de chacun des deux lobes par aggrégation de poussières au sein de la nébuleuse solaire – le nuage de gaz à partir duquel le Système solaire s'est formé –, et non par fragmentation de corps plus gros à la suite d'une collision (un processus qui aurait été plus tardif).



Cette image composite, formée à partir de plusieurs clichés pris le 1^{er} janvier 2019 à une distance de 6 700 kilomètres d'Arrokoth, montre ce dernier en vraies couleurs. On y aperçoit notamment plusieurs cratères.

6 HEURES
C'EST LE TEMPS
QUE METTENT
ACTUELLEMENT
LES DONNÉES
RECUEILLIES
PAR NEW HORIZONS
SITUÉE À PRÈS DE
45 FOIS LA DISTANCE
TERRE-SOLEIL,
POUR PARVENIR
JUSQU'À NOUS.

Dans une deuxième étude, William McKinnon, de l'université Washington de Saint-Louis, et ses collègues corroborent cette hypothèse grâce à des simulations numériques. Leurs résultats confirment qu'Arrokoth s'est formé à partir de deux corps distincts, tournant l'un autour de l'autre, qui se seraient très lentement rapprochés (l'énergie du système se serait dissipée à cause de frictions internes aux deux corps), avant d'entrer en contact «doucement», à une vitesse de quelques mètres par seconde.

Enfin, Will Grundy, de l'université d'Arizona du Nord, et ses collègues se sont intéressés à la couleur d'Arrokoth: rouge vif, d'après les clichés de *New Horizons*. Cette couleur serait due à la présence de méthanol et d'autres molécules organiques plus complexes, encore non identifiées, qui se seraient formés à la suite de l'irradiation continue d'eau et de méthane, mélangés sous forme de glace, par les rayons du Soleil.

En affinant ainsi leur connaissance d'Arrokoth, les astrophysiciens améliorent leur compréhension de la formation des petits corps du Système solaire. ■

L. G.

J. R. Spencer *et al.*, *Science*, vol. 367, article aay3999, 2020 ;
W. B. McKinnon *et al.*, *ibid.*, article eaay6620, 2020 ;
W. M. Grundy *et al.*, *ibid.*, article eaay3705, 2020

LE GRAPHÈNE DOPÉ AU... GUANO !

Quand le graphène est dopé, il présente de remarquables capacités électrocatalytiques. Ces dernières années, une myriade d'articles ont fait état de dopages à un, deux (ou plus !) éléments chimiques différents. Mais est-ce utile de passer en revue tous les dopants possibles ? Pour dénoncer cet emballement stérile, Lu Wang et ses collègues, de l'université de Prague, ont dopé du graphène avec du guano. Résultat : la fiente améliore bien les propriétés électrocatalytiques du graphène. Lu Wang et ses collègues espèrent ainsi attirer l'attention des autres chercheurs : il serait plus intéressant de comprendre pourquoi autant de matériaux dopent efficacement le graphène.

MARTIN TIANO

ACS Nano, 28 janvier 2020

FLAUBERT PARLE FRANÇAIS

Avocat, souris... : le sens d'un mot est évident dans son contexte. Mais cette désambiguïsation lexicale est une difficulté majeure pour un programme informatique qui doit traduire un texte, traiter une requête de logiciel de commande vocale ou répondre à une question. Cette approche, dite « de traitement du langage naturel », bénéficie dorénavant de FlauBERT, un réseau de neurones qui apprend le français. Cet algorithme d'intelligence artificielle est fondé sur l'architecture de BERT, conçue par une équipe de Google en 2018. Mais BERT est en anglais, et sa version multilingue est moins performante que les versions entraînées pour une seule langue. C'est ce qui a motivé la création de FlauBERT.

Fruit de la collaboration d'équipes de recherche en informatique de l'université Grenoble-Alpes, de l'université Paris-Diderot et de l'université PSL (Paris sciences et lettres), FlauBERT fait nettement progresser l'état de



Le projet FlauBERT a pu profiter du supercalculateur Jean Zay, inauguré en janvier 2020.

l'art sur des tâches de classification de textes, de désambiguïsation et de détection de paraphrases. Comme tout réseau de neurones, FlauBERT a été entraîné. Les chercheurs ont utilisé un gigantesque corpus de 70 gigaoctets avec des articles de presse écrite, de Wikipédia, des textes pris au hasard sur internet et des ouvrages de littérature, dont ceux de... Flaubert. ■

GRÉGOIRE NIETO

H. Le et al., prépublication arXiv, 9 janvier 2020, <https://arxiv.org/abs/1912.05372>

la nature : entre artificialisation et source d'inspiration

cycle de conférences et table ronde
accès gratuit

— les mardis à 19h

cité
sciences
et industrie

© Gettyimages

AVEC LE SOUTIEN DE

POUR LA SCIENCE philosophie
magazine

**21 avril
Manipuler le climat, dernier rempart contre le réchauffement planétaire ?**

Roland Séférian, climatologue à Météo-France.

28 avril**L'ingénierie écologique pour réparer ou améliorer les écosystèmes**

Luc Abbadie, écologue, Institut de la transition environnementale, Sorbonne Université.

5 mai**Des matériaux à l'architecture : s'inspirer du vivant**

Kalina Raskin, physico-chimiste et biologiste, CEEBIOS.

12 mai**Le droit peut-il sauver la nature ?**

Julien Bétaille, juriste, université Toulouse ;
Marine Calmet, juriste, présidente de l'association Wild Legal ; Pierre Charbonnier, philosophe, chercheur au CNRS ; Marine Denis, doctorante en droit international à l'université Sorbonne Paris Cité.

> Modération : Catherine Portevin, journaliste à Philosophie Magazine.

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris
M Porte de la Villette 13b Cité des sciences et de l'industrie

Informations sur cite-sciences.fr

ASTRONOMIE

GALAXIES

Govert Schilling

Glénat, 2019
224 pages, 35 euros



Notre galaxie n'est qu'une spirale parmi une myriade d'autres. Cette réalité, les astronomes ne l'ont vraiment comprise que dans les années 1920. Pour autant, que de progrès en un siècle!

L'auteur de cet ouvrage nous propose un tour d'horizon de ce riche thème dans un très beau livre, magnifiquement illustré. Les photos présentées sont belles sans doute, mais elles sont surtout pleines de sens quant au décryptage de l'Univers. Son texte est très abordable, même quand il traite des recherches les plus récentes, et aborde des sujets complexes.

Les galaxies sont des objets en soi; ce sont les lieux où naissent les étoiles; et elles sont aussi nos instruments quand nous essayons de décrypter ce que sont la matière noire et l'énergie sombre. Ainsi, à parcourir le livre, nous passons en revue des sujets aussi divers que la classification des galaxies, leurs statuts évolutifs, la description des zones de formation stellaire, la distribution des amas de galaxies, la répartition de la matière noire dans l'Univers, etc. L'ouvrage se termine en discutant l'un des plus grands mystères actuels: la matière et l'énergie que nous connaissons ne représentent que 4 % de toute la matière et de l'énergie de l'Univers!

Les échelles en jeu sont difficilement perceptibles: il y a cent fois plus d'étoiles dans l'Univers que de grains de sable sur Terre... Mais l'auteur est en perpétuelle recherche d'images pour faire percevoir les échelles de temps ou d'espace. La poésie et l'approche didactique, notamment des premiers chapitres, sont également des points qui rendent ce livre attrayant – même si quelques coquilles de traduction troublent ici et là.

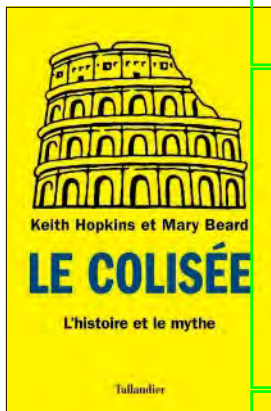
XAVIER DELFOSSE
IPAG, GRENOBLE

ARCHÉOLOGIE

LE COLISÉE

Keith Hopkins et Mary Beard

Tallandier, 2019
272 pages, 19,90 euros



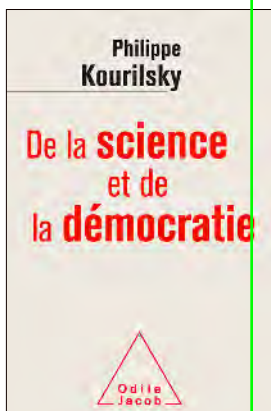
Voilà un livre, agrémenté d'anecdotes piquantes, qui séduira de nombreux lecteurs, car il additionne deux qualités rarement réunies, le sérieux et l'humour. Le sérieux, parce que les auteurs sont des savants, et l'humour parce qu'ils sont Anglais.

Le Colisée était un amphithéâtre, c'est-à-dire un lieu de spectacle, dans ce cas grandiose: ses 2,4 hectares étaient prévus pour accueillir plus de 50 000 spectateurs. Il s'y déroulait des spectacles sanglants, répartis tout au long de la journée: chasses le matin, exécution de criminels à midi et combats de gladiateurs ensuite. Les affrontements homme contre homme étaient particulièrement prisés; pour les pimenter, il était d'usage de doter ces malheureux d'armes différentes: rétiaire avec filet et trident, contre Gaulois doté de cuirasse, bouclier et épée longue. C'est ce qu'on appelle improprement «les jeux du cirque», le cirque étant réservé aux courses de chars.

Le Colisée a été inauguré en 80 de notre ère. Il a rempli sa mission pendant toute l'Antiquité romaine, puis il a connu des fortunes diverses. Il a servi successivement de fort, d'église, de jardin botanique et de fabrique de colle. Avec la naissance de l'archéologie au XIX^e siècle, il est devenu un musée pour érudits et simples curieux. Parmi les visiteurs, les auteurs nomment Hitler et des écrivains anglophones. La réputation de ce lieu atteint un niveau tel que les organisateurs des jeux Olympiques ont repris quelques-unes de ses colonnes pour illustrer les médailles données aux vainqueurs; ce décor a été en honneur de 1928 à 2000, jusqu'à ce que quelqu'un fasse remarquer que les concours sportifs du XX^e siècle n'avaient rien de commun avec la violence des combats de l'amphithéâtre.

En bref, c'est là une lecture urgente, pour s'instruire en s'amusant.

YANN LE BOHEC
PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE



DE LA SCIENCE ET DE LA DÉMOCRATIE

Philippe Kourilsky
Odile Jacob, 2019
228 pages, 22,90 euros

La démarche scientifique, notamment en biologie, fondée sur l'apport de la preuve (*evidence based medicine*), est indissociable des concepts de robustesse et de complexité. Pour l'auteur, directeur de recherche au CNRS et ancien directeur de l'institut Pasteur, elle constitue, appliquée au champ social, une démarche intellectuelle particulièrement pertinente.

Ainsi, à la fois en tant que scientifique et en tant que citoyen, il nous invite à réfléchir plus spécifiquement aux conditions de pérennité de la démocratie. Car la démocratie est en péril, confrontée aux extrémismes de tous bords, au populisme et à l'ultralibéralisme qui font florès de par le monde.

En appliquant les mêmes concepts de robustesse et de complexité, Philippe Kourilsky démontre la pertinence et la supériorité de la démocratie, un modèle incontournable à réinventer. Réagissant aux attaques dont elle est l'objet, il identifie ses faiblesses et les poisons insidieux qui la minent : l'individualisme s'opposant au débat public et à l'engagement au service de la collectivité, l'absence de solidarité, le défaut d'altruisme, le populisme et le repli sur soi, la perte de confiance dans les politiques et les experts...

Fragilisée par des assauts récurrents et violents, la démocratie peut disparaître. Confrontée à sa propre complexité, elle doit donc faire preuve de robustesse dans les moyens de lutter pour sa survie : avec efficacité sur la base de valeurs intangibles, nourrie d'une finalité sociale sans cesse réaffirmée, soutenue par des règles permettant la confrontation sereine des idées, sans négliger le contexte de mondialisation dans lequel elle doit s'affirmer. L'auteur nous ouvre ainsi des perspectives pour réinventer le futur démocratique où l'éducation et la science constituent le socle indispensable à son épanouissement.

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT

RÉACTIVER LE SENS COMMUN

Isabelle Stengers
La Découverte, 2020
200 pages, 18 euros

Cet ouvrage reprend et prolonge le livre *Penser avec Whitehead* (Seuil, 2002) d'Isabelle Stengers. Cette philosophe des sciences, licenciée en chimie et enseignante à l'université libre de Bruxelles, est en effet une spécialiste du logicien et mathématicien britannique Alfred North Whitehead (1861-1947), qui estimait que la philosophie avait pour tâche de « souder le sens commun et l'imagination ». Elle s'est fait connaître dès son premier livre écrit avec Ilya Prigogine, Prix Nobel de chimie en 1977 : *La Nouvelle Alliance - Métamorphose de la science* (Gallimard, 1979).

Elle oppose ici le « sens commun » (la tradition et le penser ensemble) au « progrès » (la modernité et les « savants »). Plus encore que Whitehead, elle porte un regard critique sur le progrès et les sciences dites « dures », en particulier les mathématiques et la physique moderne qui ne sont, en effet, plus soumises à l'évidence populaire. « L'institution qu'on appelle "la science" fait aujourd'hui systématiquement bifurquer tout ce qu'elle touche, au sens où elle oppose partout l'objectivité des faits à la subjectivité des opinions », écrit-elle à cet égard.

Notre civilisation lui paraît non seulement en déclin, comme l'affirmait Whitehead dans les années 1930, mais en pleine débâcle, avec par exemple une remise en question très actuelle de l'agriculture industrielle et l'oubli de la cause animale. Elle estime qu'il y a une « guerre des sciences », thèse qu'elle a développée dans un précédent livre (*Une autre science est possible !*, 2013) et se range parmi les « penseurs critiques » face aux « praticiens scientifiques » trop sûrs d'eux et détachés de l'homme de la rue. Bref, des idées stimulantes, mais un exposé ardu pour les non-initiés en raison de digressions. Une contradiction avec le titre ?

PIERRE JOUVENTIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS



LA VIE SECRÈTE DES TORTUES

Bernard Devaux
Delachaux & Niestlé, 2019
240 pages, 25,90 euros

L'auteur est un passionné de chéloniens. Ses remarquables efforts pour préserver la tortue de Hermann dans le Var démontrent son engagement dans la protection de cet ordre très particulier de reptiles. Quarante ans durant, il a aussi accumulé des rencontres avec des tortues en Australie, en Asie, en Afrique, aux Seychelles, en Guyane, etc. Il en a tiré de nombreuses observations sur ces animaux, leur sexualité, leur biologie, etc. Ses grandes connaissances et de très belles photographies rendent ce tour d'horizon de la planète tortue plus que bienvenu.

LA BELLE AU BOIS DORT-ELLE VRAIMENT ?

Laurent Vercueil
Humensciences, 2020
224 pages, 19 euros

Interpréter les comportements des personnages de contes de fées par des troubles neurologiques : c'est le parti pris de l'auteur, neurologue au CHU de Grenoble-Alpes. Ainsi, il discute longuement la figure du zombie, ce corps sans conscience, qui pourrait être la victime d'une intoxication par des psychotropes. Les loups-garous pourraient être des victimes de la lycanthropie ou de porphyrie congénitale. Bref, les possibilités neurologiques ou médicales existent pour interpréter ces cas repérés depuis longtemps dans la culture populaire.

POURQUOI ?

Philippe Hunemann
Autrement, 2020
352 pages, 19,90 euros

Un philosophe des sciences envisage la question « Pourquoi ? » sous de multiples angles à partir de situations concrètes. Pourquoi les corps tombent-ils ? Pourquoi Napoléon a-t-il perdu à Waterloo ? Pourquoi Mickey a-t-il ouvert le frigo ? Les réflexions qui surgissent de ses réponses souvent savantes sont toujours stimulantes. Une lecture pour se décontracter, qui plaira à ceux qui aiment apprendre à penser.

PARIS

JUSQU'AU 21 SEPTEMBRE 2020

Musée de l'Homme

www.museedelhomme.fr

Dernier repas à Pompéi



Dans la société romaine du 1^{er} siècle de notre ère, que mangeait-on, et comment? Cette exposition propose à ses visiteurs de le découvrir en montrant des vestiges alimentaires ou liés à l'alimentation provenant des sites antiques de Pompéi et Herculaneum, ensevelis par l'éruption du Vésuve en l'an 79. On pourra y voir des aliments carbonisés tels que gousses d'ail, figes, dattes ou châtaignes, du pain, de

la vaisselle de réception ou des ustensiles de cuisine. Ces vestiges remarquablement conservés appartiennent aux collections du Musée archéologique national de Naples et sortent pour la première fois d'Italie. Ils sont répartis dans des espaces représentant une boulangerie, une cuisine et une salle à manger. Un quatrième espace figurant un laboratoire met en avant le travail des archéobotanistes. ■

LE HAVRE

DU 28 MARS AU 8 NOVEMBRE 2020

Muséum d'histoire naturelle du Havre

www.museum-lehavre.fr

L'aventure Charcot



Photographies, plans originaux des navires, instruments, maquettes, spécimens naturalisés et autres documents ou objets viennent raconter les deux premières expéditions en Antarctique de Jean-Baptiste Charcot, père fondateur des explorations polaires françaises, et de son équipe, dans la première décennie du 20^e siècle. ■

MONTBELIARD

JUSQU'AU 7 MARS 2021

Pavillon des sciences

www.pavillon-sciences.com

Mission corps humain



Dix-neuf « meubles », représentant chacun un organe ou un système (musculaire, digestif...) du corps humain et équipés de supports interactifs, font découvrir au visiteur le rôle principal de l'organe en question et ses fonctions insoupçonnées. Avec un espace de type « centre de contrôle », qui symbolise le cerveau. ■

ET AUSSI

Jeudi 2 avril, 18 h

La Turbine, Annecy

www.univ-smb.fr/amphis

COMMENT EN SOMMES-NOUS ARRIVÉS LÀ ?

Le physicien Dominique Boutigny explique les circonstances et les lois qui ont régi l'Univers depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui.

Du 4 avril au 3 mai

Parc zoologique de Paris

RENDEZ-VOUS SAUVAGE PRINTEMPS

Nourrissages, animations, concours photo et visites guidées sont au programme de ce premier rendez-vous de l'année qui en comptera trois, dévolus aux espèces « fascinantes ».

Mardi 7 avril, 19 h 30

Planétarium

de Vaux-en-Velin

www.planetariumvvy.com

Tél. 04 78 79 50 13

L'ÉQUATION DE NAVIER-STOKES

Le physicien Thierry Dauxois et la mathématicienne Laure Saint-Raymond, accompagnés de l'artiste Alex Andrix, devisent autour de l'équation reine de la mécanique des fluides.

Mercredi 15 avril, 18 h 30

Musée du quai Branly, Paris

www.quaibranly.fr

LA POPULATION MONDIALE EN 2030

Le démographe Hervé Le Bras brosse le tableau pas très encourageant d'un monde qui comptera 8,5 milliards d'humains mal répartis, tant sur le plan géographique que sur ceux de l'âge et de la richesse.

Lundi 20 avril, 19 h

Centre Pompidou, Paris

www.bpi.fr

LES PLANTES SONT-ELLES SENSIBLES ?

Catherine Lenne, physiologiste végétale, et Marc-William Debono, neuroscientifique, expliquent ce que l'on a appris ces dernières années sur la « sensibilité végétale ».

SAINT-MANDÉ (VAL-DE-MARNE)

JUSQU'AU 12 JUIN 2020

Géoroom
www.shom.fr

300 ans d'hydrographie française



La France a été, en 1720, le premier État à se doter d'un service hydrographique national, qui a pris en 1971 le nom de Shom (Service hydrographique et océanographique de la marine, sous tutelle du ministère des Armées). Le tricentenaire de cet événement est l'occasion de raconter son histoire et d'expliquer ses missions (sécurité de la navigation, soutien d'opérations militaires, aide aux explorations, prévention des risques...). En face du Géoroom, sur les grilles du jardin Alexandra David-Néel, des panneaux présentant des cartes marines, des modélisations des fonds marins et du littoral, des vues du globe terrestre ou des photos de navires spécialisés complètent l'exposition. ■

TOULOUSE

JUSQU'AU 27 SEPTEMBRE 2020

Musée Saint-Raymond
www.saintraymond.toulouse.fr

Wisigoths, rois de Toulouse

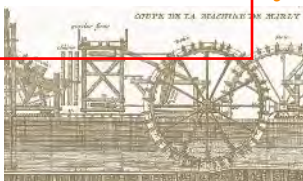
Il y a 1600 ans, en 419, l'Empire romain d'Occident installait les Wisigoths dans le sud-ouest de la Gaule. Toulouse, leur résidence royale, devint alors la capitale de ce que les historiens désignent souvent comme le royaume de Toulouse, qui a duré jusqu'en 507. Appuyée par plus de 250 objets, des vidéos, des dispositifs ludiques et numériques, l'exposition retrace cette histoire méconnue et présente les trouvailles archéologiques, certaines très récentes, voire inédites, qui documentent la culture des Wisigoths et leur présence dans la région. ■



MARLY-LE-ROI

PERMANENT

Musée du Domaine royal
de Marly
www.musee-domaine-marly.fr



Musée du Domaine royal de Marly

Fermé depuis 2016 à la suite d'une inondation, le musée a rouvert ses portes en janvier, après une rénovation. Au-delà de l'architecture de cette résidence intime créée par et pour Louis XIV, de son histoire et de l'atmosphère qui y régnait, les visiteurs découvrent les secrets de la fameuse machine de Marly, gigantesque mécanisme en bois, prouesse pour l'époque, qui alimentait en eau les jardins du roi. ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 5 avril, 9 h 30
Sisteron (Vaucluse)

www.cen-paca.org
Tél. 04 42 20 03 83

LA VALLÉE DU JABRON

Une balade géologique à la journée pour explorer les sédiments particuliers que contient cette vallée méconnue des touristes.

Dimanche 12 avril, 9 h
Thomery

(Seine-et-Marne)
www.anvl.fr
Tél. 01 64 22 61 17

ARCHÉOLOGIE EN FORÊT
DE FONTAINEBLEAU

Une journée à la découverte des abris ornés du mont Aiveu, colline haute de 112 mètres au sud-est de la forêt de Fontainebleau.

Jeudi 16 avril, 14 h 30
Iffendic (Ille-et-Vilaine)

www.cpie-broceliande.fr
Tél. 02 97 22 74 62

ÇA GROUILLE
DANS LA LANDE

Une après-midi où les participants, petits et grands, observent, touchent, apprennent à connaître et à reconnaître les petites bêtes qui vivent dans les ajoncs et la bruyère.

Vendredi 24 avril, 19 h
Entraygues (Var)

www.cen-paca.org
Tél. 04 42 20 03 83

PAPILLONS DE NUIT
À ENTRAYGUES

À l'aide de lampes-pièges, une soirée de chasse photographique de papillons avec, si possible, leur identification.

Samedi 25 avril, 14 h
Chambonchard (Creuse)

www.tpo-auvergne.org
Tél. 04 70 28 21 83

OISEAUX DU BOCAGE

Une après-midi de printemps pour écouter les oiseaux chanter et admirer leur plumage.

Dimanche 26 avril, 9 h 30
Salins-les-Bains (Jura)

<http://cbnfc-ori.org>
Tél. 06 15 15 19 74

MOUSSES
DU GOUR DE CONCHE

Une sortie botanique sur le mont Poupet et sa cascade du Gour de Conche, consacrée aux bryophytes.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWECK

DE L'ENCYCLOPÉDIE DE DIDEROT À WIKIPÉDIA

Avec l'évolution des techniques, les encyclopédies
ont connu des transformations radicales.
Pas seulement en termes de volumes de textes.



Les encyclopédies imprimées sont soumises à de fortes contraintes matérielles, contrairement aux encyclopédies en ligne.

Pendant cinq siècles, de 1450 à 1990, les livres ont été imprimés, avec de l'encre, sur du papier. Et nous pouvons nous interroger sur la manière dont cette technique a contraint et façonné les textes qu'elle a permis de diffuser. Une façon de le faire est de comparer la forme de ces textes à celle de ceux qui leur ont succédé.

La première contrainte que l'imprimerie semble imposer aux textes imprimés porte sur leur nombre de pages. D'une part, parce qu'un livre doit pouvoir être tenu en main, rangé dans une bibliothèque, etc. D'autre part, parce qu'il doit avoir un prix accessible pour ses lecteurs potentiels.

Après le recueil de Raymond Queneau *Cent mille milliards de poèmes*, qui contient effectivement 10^{14} sonnets – mais 10 pages seulement –, les textes imprimés les plus longs semblent être les encyclopédies, qui occupaient jadis des rayonnages entiers dans les bibliothèques et coûtaient l'équivalent de plusieurs milliers d'euros.

L'encyclopédie de Diderot, par exemple, contenait 18 000 pages, réparties en

17 volumes, auxquels s'ajoutaient 11 volumes de planches. Et les autres encyclopédies imprimées avaient une taille du même ordre de grandeur. Cette contrainte sur le nombre de pages en impose deux autres: l'une sur la taille de chaque entrée de l'encyclopédie et l'autre sur leur nombre.

Une entrée d'une encyclopédie imprimée tenait généralement en quelques

Wikipédia compte plus de 2 millions d'entrées, contre 71 818 pour l'encyclopédie de Diderot

lignes, parfois en quelques pages. Ainsi, l'entrée «Diderot» d'une encyclopédie imprimée était-elle bien plus courte qu'une biographie de Diderot ou qu'un livre consacré à sa pensée, qui faisait souvent plusieurs centaines de pages.

La longueur astronomique de certaines entrées des encyclopédies diffusées sur le

web, telle Wikipédia, nous montre, en creux, à quel point rédiger l'entrée d'une encyclopédie imprimée demandait un important effort de synthèse, mais aussi quelles coupes arbitraires étaient opérées lors d'une telle rédaction.

Mais c'est surtout le nombre d'entrées, singulièrement limité faute de place, que l'on constate dans les encyclopédies imprimées quand on les compare avec une encyclopédie diffusée sur le web. Wikipédia, par exemple, compte plus de 2 millions d'entrées en français, quand l'encyclopédie de Diderot en comptait 71 818.

Wikipédia comporte ainsi une série d'entrées sur des personnes – par exemple le maire d'une petite commune – assez célèbres pour y figurer, mais pas assez pour justifier un article dans une encyclopédie imprimée. Cela nous montre que les encyclopédies en ligne ne prolongent pas uniquement les encyclopédies imprimées, mais aussi les annuaires tels que le *Who's Who* ou *Le Trombinoscope*.

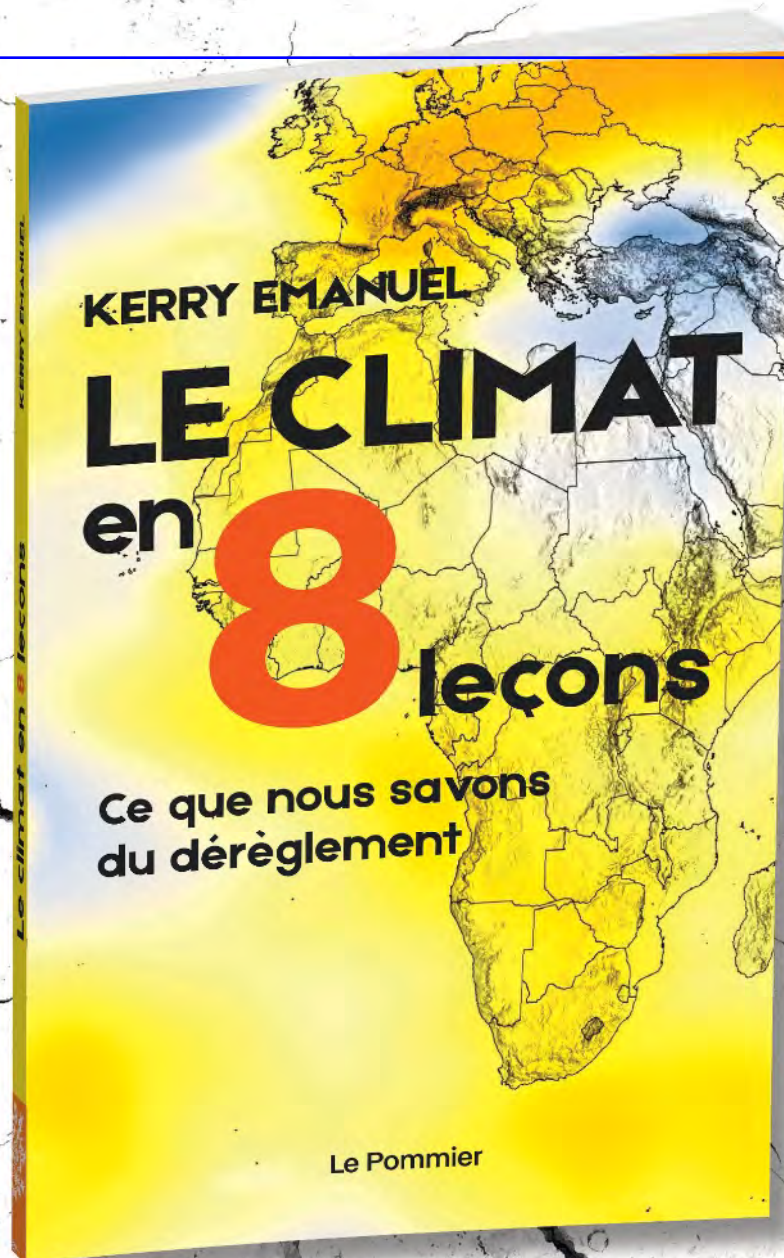
Une autre série d'entrées de Wikipédia contient des informations pratiques, telle l'entrée consacrée aux prises électriques dans le monde, qui permet à de nombreux voyageurs de savoir par exemple qu'avant de se rendre au Royaume-Uni, il faut se munir d'un adaptateur, les prises électriques y étant de type G. Cela nous montre que les encyclopédies en ligne ne prolongent pas uniquement les encyclopédies et les annuaires imprimés, mais aussi les guides de voyage où nous trouvons, jadis, ce type d'informations.

Wikipédia est donc tout à la fois l'encyclopédie de Diderot, le *Who's Who* et le *Guide du routard*.

Avec l'évolution des techniques, de l'imprimerie au web, les frontières entre une encyclopédie, un annuaire et un guide de voyage sont devenues poreuses. Wikipédia agglomère des informations aussi bien essentielles et fondamentales, qu'anecdotiques et plus anodines. En rassemblant des contenus aussi divers, tendrait-elle à devenir une encyclopédie vraiment universelle? ■

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

COMPRENDRE POUR MIEUX AGIR





LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DE LA PROBITÉ AVANT TOUT

Le baromètre 2020 de la confiance des Français envers les politiques et leurs institutions souligne l'importance accordée à l'honnêteté des gouvernants.



La démocratie représentative est le seul régime politique où le consentement des gouvernés est nécessaire à son fonctionnement. Par le vote, les citoyens choisissent un candidat et valident les institutions qui composent ce régime. Aussi, la mesure scientifique de la confiance politique est indispensable pour en évaluer la solidité.

Depuis 2009, le Centre de recherches politiques de SciencesPo (Cevipof) publie chaque année un baromètre annuel de confiance politique qui repose sur un échantillon représentatif de la population française prenant en compte les critères de sexe, d'âge, de catégorie socioprofessionnelle, de région et de taille d'agglomération. Il dévoile les niveaux de confiance envers les responsables politiques et les institutions qui caractérisent l'État au travers de ses fonctions régaliennes (armée, police, justice), représentatives (municipalités, régions, nation, Europe), et sociales (hôpitaux, écoles, associations). La dernière enquête a été réalisée en février 2020.

Les fonctions de proximité (le maire, les PME) et celles dédiées à la protection (hôpitaux, armée) récupèrent les taux de confiance les plus élevés. En bas de l'échelle, un quart des personnes interrogées ont globalement confiance dans le gouvernement, les syndicats ou les médias, et 13% dans les partis politiques. Les institutions et les fonctions locales

Seuls 13% des sondés ont globalement confiance dans les partis politiques

sont donc plus populaires que celles qui touchent de près le pouvoir politique.

Si cette tendance générale confirme celle des années précédentes, les résultats du baromètre permettent de saisir les ressorts profonds de la représentativité du corps social, c'est-à-dire ce qui motive les gouvernés à consentir au pouvoir des gouvernants. Depuis plusieurs années, près des

trois quarts des sondés considèrent que le personnel politique est plutôt corrompu.

Concernant les qualités attendues des gouvernants, l'«honnêteté» arrive en tête de liste pour les deux tiers des sondés, tandis que la «bonne connaissance des dossiers» ne touche que 28% d'entre eux. L'ordre d'importance donné à ces critères révèle que la confiance au sens de l'anglais *trust*, qui repose sur le pari du comportement coopératif d'autrui, est une dimension beaucoup plus importante que celle, générique et impersonnelle, de confiance au sens de l'anglais *confidence*, qui s'appuie sur la compétence.

En outre, seuls un quart des sondés considèrent qu'il est important que le personnel politique soit «proche de gens» comme eux. La perception de la probité n'est donc pas liée à l'idée d'un rapprochement affinitaire entre les représentés et les élus.

Quels enseignements tirer de ces résultats? L'un est que les réformes visant à faire correspondre la composition de nos assemblées politiques à la diversité du corps social dans toutes ses composantes (instauration de quotas, procédures participatives sur des questions aux enjeux sociaux complexes...) ne permettent pas de réduire la défiance. En effet, la solidité du système représentatif repose sur une démarcation nette entre l'État et la société, démarcation que la recherche d'homologie entre élus et citoyens tend à brouiller.

En revanche, la probité reconnue des mandataires de l'État est une valeur démocratique incontestable. Cette exigence est renforcée par une profonde mutation du rapport des citoyens au politique. Comme l'a analysé Luc Rouban, chercheur au Cevipof, la perception de l'intérêt général est fragilisée par un appel accru à la démocratie directe, à la temporalité immédiate, pour satisfaire des demandes multiples. L'essor de cette nouvelle culture politique définit ce qu'il appelle *La Matière noire de la démocratie* (Presses de SciencesPo, 2019). ■

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

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

*DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE*



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

> En utilisant deux techniques différentes pour mesurer la constante de Hubble, qui correspond à la vitesse actuelle d'expansion de l'Univers, les chercheurs obtiennent deux résultats incompatibles.

> Une méthode utilise des étoiles et des supernovæ dans l'Univers actuel et remonte

vers le passé. L'autre analyse la lumière émise peu après le Big Bang et revient vers le présent.

> L'origine du désaccord, théorique ou expérimentale, reste à déterminer.

L'AUTEUR



RICHARD PANEK
journaliste scientifique,
auteur notamment de
The 4 Percent Universe
(Mariner Books, 2011)

La crise cosmique de la constante de Hubble

La vitesse d'expansion de l'Univers a fait l'objet de deux mesures aux résultats incompatibles.

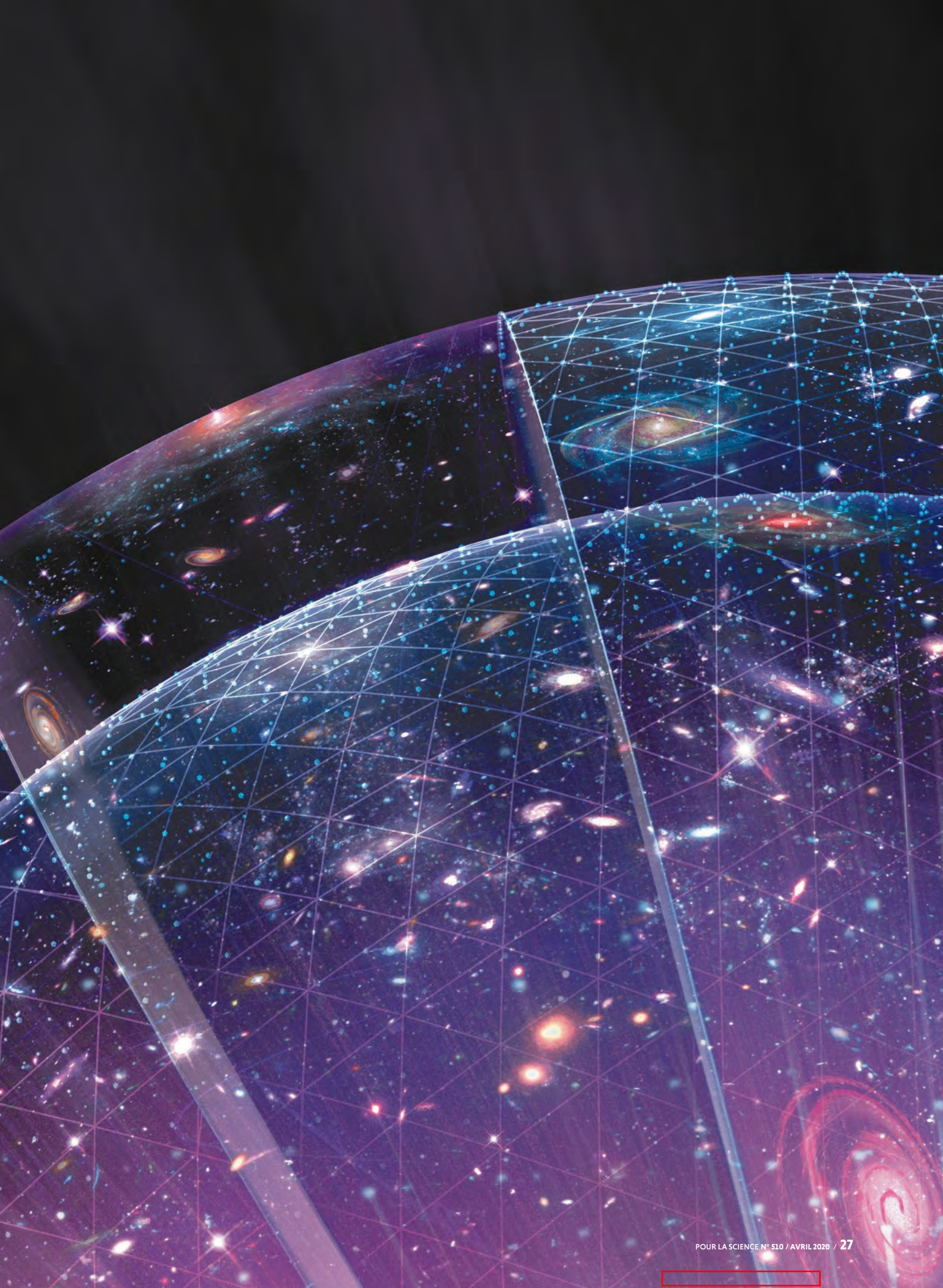
Une troisième vient de compliquer encore la situation. Chacune semble pourtant fiable. Où est l'erreur ?

Vers la fin du xx^e siècle, les cosmologistes avaient le sentiment d'avoir construit un modèle presque complet pour décrire l'Univers. Certes, quelques énigmes

subsistaient. Bien sûr, le modèle invoquait des concepts qui restent encore à étudier en détail. Mais de façon globale, ce cadre semblait offrir un tout solide et cohérent : l'Univers contiendrait environ deux tiers d'« énergie sombre » (de nature encore inconnue, mais qui expliquerait l'expansion accélérée de l'Univers), un quart de « matière noire » (de nature également inconnue, mais qui explique l'évolution des structures cosmiques comme les galaxies et amas de galaxies), et 4 à 5% de matière « ordinaire » (celle qui compose les êtres vivants, les objets de notre quotidien, les planètes, les étoiles, etc.). Toutes les observations tendaient à confirmer cette vision du monde. Toutes ? Non...

Ces dernières années, un désaccord s'est fait jour entre les résultats de deux méthodes >

Tels des géomètres topographes, les astronomes mesurent les distances dans l'Univers. Ils estiment alors à quelle vitesse ces distances varient du fait de l'expansion cosmique.



> différentes de mesure de la vitesse d'expansion de l'Univers, un paramètre nommé « constante de Hubble » et noté H_0 . Les approches partant d'observations dans l'Univers actuel et remontant le temps jusqu'aux âges les plus reculés donnent une certaine valeur; et les techniques partant de l'Univers jeune pour revenir jusqu'à aujourd'hui en donnent une autre.

UNE FAIBLE DIFFÉRENCE, MAIS INCONCILIABLE

À première vue, la différence entre les deux valeurs semble minime: respectivement 67,4 et 74,0 kilomètres par seconde et par mégaparsec (1 mégaparsec correspond à 3,26 millions d'années-lumière). Cela signifie que dans chaque direction, sur une distance de 1 mégaparsec, l'Univers s'étire toutes les secondes d'environ 70 kilomètres. Rapporté aux échelles de l'espace-temps de l'Univers, l'écart entre les deux mesures devient d'une importance cosmique cruciale. Grâce à ce paramètre, les cosmologistes extrapolent vers le passé l'évolution de l'Univers et en déduisent son âge, environ 13,8 milliards d'années. Ils l'utilisent aussi pour se projeter dans le futur et déterminer quand l'espace entre les galaxies deviendra si vaste que le cosmos autour du voisinage immédiat de la Voie lactée semblera totalement vide. Les chercheurs espèrent également, en disposant d'une mesure précise de la constante de Hubble, éclaircir la nature de l'énergie sombre.

Malgré les efforts des scientifiques, les deux stratégies pour mesurer la constante de Hubble persistent à fournir des valeurs différentes. Cette situation n'est pas rare en science. Mais en général, une analyse fine suffit pour faire disparaître les incompatibilités. Ces dix dernières années, les cosmologistes partaient du principe qu'il en serait de même pour la constante de Hubble. Mais le désaccord a persisté et, surtout, il s'est aggravé. Les mesures successives des uns et des autres n'ont fait que renforcer le fossé qui sépare les deux résultats. Qui plus est, d'autres équipes qui ont adopté des approches indépendantes ont compliqué la situation. Aujourd'hui, les cosmologistes s'accordent sur un point: nous avons un problème!

Où se cache l'erreur? S'est-elle glissée quelque part dans les mesures ou dans leur interprétation? Les chercheurs y travaillent, mais ces pistes semblent peu probables. Cela ne laisse qu'une dernière option, tout aussi peu probable mais de plus en plus à considérer: l'erreur se nicherait dans le modèle standard de la cosmologie.

Pendant une grande partie de l'histoire humaine, « l'étude » des origines du monde était une affaire de mythes et de légendes, sur le mode « Au commencement... ». Ce n'est qu'en 1925 que l'astronome américain Edwin



Les astronomes ont calibré les céphéides et les géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan

Hubble a fait entrer ces grandes questions fondamentales dans le domaine de la recherche empirique. Il venait de résoudre une énigme vieille de plusieurs siècles et relative à la nature de taches floues sur la voûte céleste – que les astronomes nommaient des nébuleuses. Ces nébuleuses étaient-elles des nuages de gaz entre les étoiles? Ou ces nébuleuses étaient-elles des sortes d'« univers-îles », au-delà des étoiles? Grâce à ses observations, Hubble a montré que l'une des nébuleuses se trouve beaucoup plus loin que les étoiles visibles: nous vivons dans un univers-île, la Voie lactée, et la nébuleuse en question est une galaxie voisine, celle d'Andromède.

Hubble a continué à bouleverser la vision du monde de ses contemporains. En analysant



Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine voisine de la Voie lactée dont la distance est connue avec précision.

la lumière provenant de plusieurs de ces fameuses nébuleuses, il a constaté que leur spectre électromagnétique était étiré vers les grandes longueurs d'onde. On parle de décalage vers le rouge (couleur correspondant aux plus grandes longueurs d'onde du spectre visible). Ce phénomène s'explique par l'effet Doppler: les ondes émises par une source sont décalées en fréquence (ou en longueur d'onde) quand cette source se déplace par rapport à l'observateur. Le résultat de Hubble impliquait donc que les nébuleuses s'éloignaient de la Terre et de la Voie lactée. En 1927, le physicien et chanoine belge Georges Lemaître a noté que si l'Univers était en expansion, on devrait constater que plus une galaxie est éloignée, plus le décalage vers le rouge de sa lumière est important. Ainsi, plus elle est lointaine et plus elle s'éloigne vite. En 1929, en accumulant plus de mesures, Hubble est parvenu à la même conclusion: l'Univers est en expansion.

Les physiciens se sont aussitôt demandé ce qui se passerait si on remontait le temps et regardait cette expansion à l'envers. Les galaxies se rapprocheraient les unes des autres, formeraient un état très dense d'où serait né l'Univers. Très vite, quelques théoriciens ont suggéré que cet état aurait marqué la naissance de l'espace et du temps, un phénomène qui prendra plus tard le nom de Big Bang. Cette dénomination se voulait initialement péjorative, car l'idée semblait bien trop fantasque. Pendant plusieurs décennies, en l'absence de preuves expérimentales, les physiciens étaient dans l'incapacité de soutenir solidement cette théorie.

La situation a changé en 1965 quand Arno Penzias et Robert Wilson, des laboratoires Bell, ont pointé leur antenne radio vers le ciel. Ils ont capté un rayonnement homogène provenant de toutes les directions. Or depuis 1948, des physiciens comme Ralph Alpher, Robert Herman et d'autres avaient considéré que si l'Univers avait émergé d'un état primordial très dense et très chaud, il se serait refroidi lors de son expansion et aurait émis une lumière caractéristique dans sa jeunesse. Ils avaient théoriquement calculé que la température associée à ce rayonnement serait de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. Or, avec une mesure d'environ 3 kelvins, Penzias et Wilson avaient apporté une preuve suffisante pour convaincre les cosmologistes et établir un consensus autour du modèle du Big Bang.

En 1970, l'astronome Allan Sandage, un proche de Hubble, a publié un article dans la revue *Physics Today* qui a profondément marqué de son empreinte la recherche en cosmologie et qui était intitulé «Cosmologie: La quête de deux nombres». Le premier nombre était la vitesse d'expansion actuelle de

l'Univers. Le second, l'accélération de l'expansion. À l'époque, on pensait que la vitesse d'expansion devait diminuer, l'Univers étant rempli de matière qui agit gravitationnellement sur elle-même et qui constituerait donc un frein à l'expansion. On parlait donc plutôt de paramètre de décélération.

C'est le second nombre qui a été mesuré en premier. À la fin des années 1980, deux équipes se sont lancées dans son estimation en utilisant les mêmes outils, mais de façon indépendante: les supernovæ de type Ia, des étoiles massives qui explosent en fin de vie et que les astrophysiciens pensaient utiliser comme «chandelles standard». Le principe est le même que lorsque l'on considère une ampoule de 60 watts, qui semble moins lumineuse si on la regarde de plus loin: si l'on sait que l'ampoule a une puissance de 60 watts, on est capable de déterminer sa distance à partir de sa luminosité apparente.

S'ÉCLAIRER AVEC DES CHANDELLES STANDARD

Les cosmologistes savent déterminer la luminosité intrinsèque des supernovæ de type Ia (l'équivalent du «60 watts») et sont donc capables de les utiliser pour mesurer des distances cosmiques. Mais si la vitesse d'expansion a diminué au cours du temps, comme le pensaient les astronomes, alors aux grandes distances une supernova serait moins éloignée et donc plus brillante que si l'Univers a enflé à un rythme constant. Or les deux équipes ont constaté l'inverse: les supernovæ les plus lointaines étaient moins brillantes que prévu et étaient donc plus éloignées qu'on ne l'attendait. En 1998, les chercheurs ont conclu que l'expansion de l'Univers accélère. La source de cette accélération est ce qu'on nomme l'«énergie sombre» (ou «noire»), terme générique et temporaire en attendant d'en déterminer la vraie nature.

La constante de Hubble, le premier nombre de Sandage, a été estimée avec une bonne précision peu après. Pendant plusieurs décennies, ce paramètre a été la source de débats animés parmi les astronomes. Sandage lui-même avait affirmé que H_0 vaudrait autour de 50 kilomètres par seconde et par mégaparsec, valeur qui porterait l'âge de l'Univers à environ 20 milliards d'années. D'autres astronomes penchaient plutôt pour une constante de Hubble proche de 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec, soit un âge cosmique d'environ 10 milliards d'années. Une telle différence était embarrassante; il fallait réduire cette incertitude.

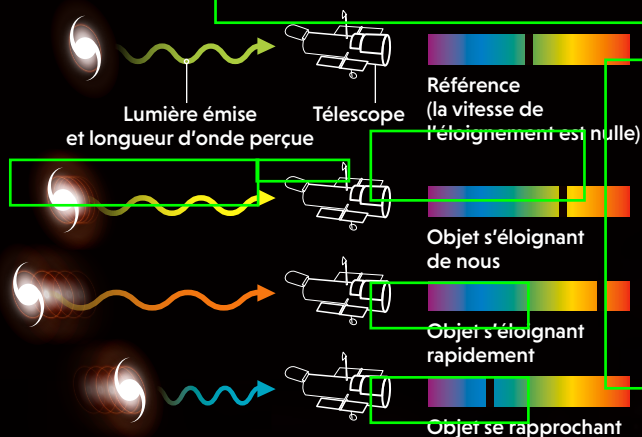
En 2001, Wendy Freedman, de l'université de Chicago, et ses collègues ont utilisé le télescope spatial Hubble pour réaliser la première mesure fiable de la constante de Hubble. Dans ce projet, les chandelles >

UN CONFLIT AU CŒUR DE LA COSMOLOGIE

La constante de Hubble (H_0) indique le taux d'expansion actuel de l'Univers. Sa valeur est cruciale pour la cosmologie mais elle fait l'objet d'une grave controverse. Contrairement à ce qu'on espérait, les diverses méthodes d'estimation de H_0 sont en désaccord. L'écart entre les mesures s'expliquerait soit par des erreurs dans une des approches, soit par un problème plus fondamental dans notre compréhension actuelle de l'Univers.

MESURER LA VITESSE DES GALAXIES

La méthode classique pour mesurer H_0 consiste à déterminer à la fois la vitesse d'éloignement et la distance de galaxies lointaines. On obtient la vitesse grâce au phénomène de décalage vers le rouge cosmologique : du fait de l'expansion de l'Univers, le spectre de la lumière d'un objet qui s'éloigne de nous se décale vers les grandes longueurs d'onde. Plus le décalage est grand, plus la vitesse d'éloignement est élevée.



Big Bang

OBSERVATION DE L'UNIVERS PRIMORDIAL

La constante de Hubble peut être mesurée en utilisant le fond diffus cosmologique (CMB), le rayonnement fossile du Big Bang émis quand l'Univers avait à peine 379 000 ans et ne contenait jusque-là qu'un plasma dense et chaud. Des ondes, dites « acoustiques », se propageant dans le plasma ont formé des zones de surdensité ou de sous-densité de matière qui ont marqué le fond diffus de leur empreinte en y créant de petites fluctuations de température. En analysant les propriétés de ces fluctuations, les cosmologistes en font une référence pour suivre la croissance de l'Univers au cours de son histoire. De cette étude, on détermine la constante de Hubble.

Fond diffus cosmologique

Aujourd'hui

ESCALADER L'ÉCHELLE DES DISTANCES

Déterminer les distances dans l'Univers est bien plus difficile que d'estimer les vitesses. La stratégie des astronomes consiste à utiliser diverses techniques qui sondent différentes plages de distances se recouvrant, l'une servant à étalonner la suivante. Les céphéides (des étoiles variables dont on connaît la luminosité intrinsèque) constituent le premier barreau de l'échelle. On les utilise pour calculer la distance des galaxies voisines. Les galaxies plus lointaines nécessitent d'utiliser des objets plus lumineux, dont on peut aussi connaître la luminosité intrinsèque, en l'occurrence certaines explosions d'étoiles, les supernovae de type Ia.

Premier échelon : on calcule la distance des céphéides (dans la Voie lactée) en utilisant la méthode de la parallaxe, une technique de triangulation. Avec la luminosité apparente et la distance, on détermine la luminosité intrinsèque de ces étoiles.

Supernova et céphéide dans une galaxie proche

Céphéide dans la Voie lactée

Soleil

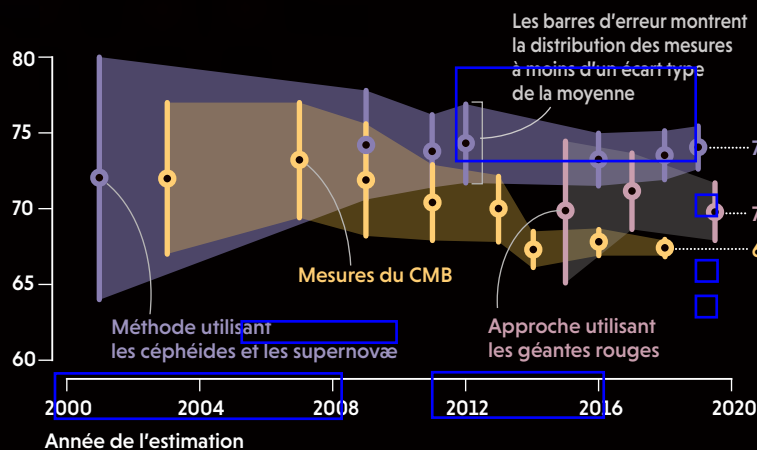
Terre

Deuxième échelon : la distance des galaxies voisines est déterminée grâce aux céphéides (en utilisant les résultats du premier échelon). Ces données servent à calibrer la luminosité intrinsèque des supernovae se produisant dans ces galaxies.

Supernova de type Ia dans une galaxie lointaine

Troisième échelon : on calcule la distance des galaxies lointaines avec les supernovae.

Estimation de la constante de Hubble (en kilomètres par seconde et par mégaparsec)



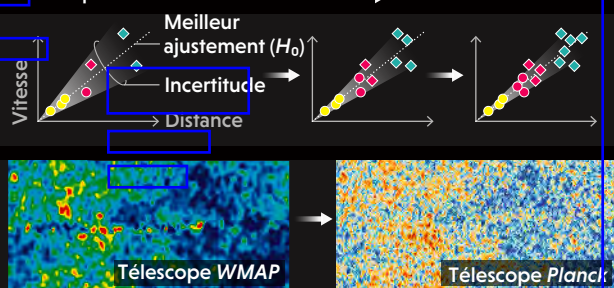
UN DÉSACCORD QUI SE CREUSE

La mesure fondée sur le CMB donne $H_0 = 67$ (en kilomètres par seconde et par mégaparsec, 1 mégaparsec vaut 3,26 millions d'années-lumière). Le résultat calculé avec les céphéides est $H_0 = 74$. Une nouvelle méthode utilisant des étoiles géantes rouges dont les éruptions ont une luminosité intrinsèque connue indique une valeur $H_0 = 70$, juste entre les deux précédentes. Et sans recouvrement des barres d'erreur.

La précision augmente avec le temps

Méthode de l'échelle des distances : augmentation du nombre de mesures d'étoiles individuelles

Méthode du CMB : instruments plus précis



VERS UNE RÉCONCILIATION... OU DE LA NOUVELLE PHYSIQUE

Les chercheurs améliorent en permanence la précision de leur estimation de la constante de Hubble. Ils réduisent leurs incertitudes dans l'espoir de voir les résultats converger. Des télescopes plus grands observent des céphéides plus lointaines dans l'Univers, le satellite *Planck* a considérablement amélioré les données sur le CMB. Mais si les résultats restent inconciliables, les modèles cosmologiques seront à revoir.

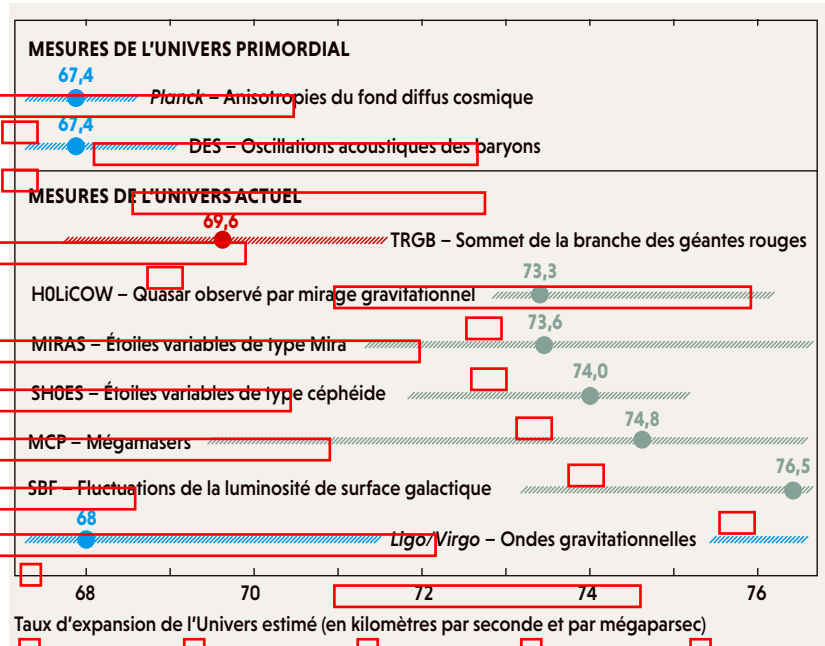
> standard étaient des étoiles céphéides variables, des astres dont la brillance augmente et diminue avec une période qui est reliée à leur luminosité absolue. En trouvant une valeur intermédiaire de 72 ± 8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, cette équipe a tranché en plein milieu du débat et a mis tout le monde d'accord.

Il restait à obtenir une mesure plus précise. Adam Riess, qui a partagé en 2011 le prix Nobel de physique pour son rôle dans la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers en 1998, a lancé un nouveau projet purement astronomique, SH0ES (*Supernovae, H_0 , for the equation of state of dark energy*). Cette équipe a utilisé à la fois les céphéides et les supernovae de type Ia (dont certaines des plus distantes jamais observées) comme chandelles standard. En 2005, l'équipe a obtenu un résultat préliminaire de 73 ± 4 , un résultat très proche de celui obtenu par l'équipe de 2001, mais avec des barres d'erreur réduites. Depuis, la collaboration SH0ES a publié plusieurs mises à jour, en améliorant les incertitudes. La plus récente, en 2019, fait état d'une constante de Hubble de $74,03 \pm 1,42$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Dans la méthode suivie par Adam Riess et d'autres, on commence par des mesures sur des objets proches et on utilise ces données pour calibrer des chandelles standard de plus en plus lointaines. Depuis une vingtaine d'années, des chercheurs utilisent aussi l'approche inverse. Ils partent de l'Univers très jeune et remontent jusqu'à aujourd'hui. Leur point de départ n'est autre que le fond diffus cosmologique observé pour la première fois par Wilson et Penzias en 1965.

Le fond diffus est un rayonnement émis dans l'Univers alors qu'il n'était âgé que de 379 000 ans. À cette époque, le plasma de protons et d'électrons libres qui emplissait le cosmos est devenu assez froid pour que des atomes neutres d'hydrogène s'y forment. Le plasma est alors devenu transparent, ce qui a permis aux photons de voyager à travers l'Univers et de parvenir jusqu'à nous, 13,8 milliards d'années plus tard. Alors que Wilson et Penzias avaient observé un rayonnement homogène en température dans toutes les directions du ciel, les théoriciens ont prédit qu'avec des instruments plus sensibles, les chercheurs détecteraient des fluctuations de température. Celles-ci correspondent à des surdensités dans le plasma primordial, qui ont donné naissance aux structures de l'Univers: les galaxies, les amas de galaxies et les superamas de galaxies.

En 1992, la première sonde spatiale dédiée à la recherche du fond diffus cosmologique, *Cobe* (Cosmic background explorer), a détecté ces fluctuations de température pour la première fois. Puis, en 2003, la sonde WMAP



Les chercheurs font appel à diverses méthodes pour estimer la vitesse actuelle d'expansion de l'Univers. Les cosmologistes utilisent le fond diffus cosmologique ou les oscillations acoustiques des baryons (en bleu); les astronomes se servent de chandelles standard, des indicateurs de distances. D'autres techniques indépendantes s'appuient sur des quasars ou sur les ondes gravitationnelles.

(Wilkinson microwave anisotropy probe) a amélioré la résolution. Les chercheurs ont alors pu analyser les propriétés statistiques de ces fluctuations et déterminer les conditions régnant dans le plasma primordial. En particulier, ils ont identifié la taille des ondes acoustiques qui s'y propageaient et qui ont provoqué les zones de surdensité. En connaissant la «vitesse du son», les cosmologistes ont défini une échelle de référence grâce aux «taches» dans le fond diffus. Cette échelle de référence a ensuite été utilisée pour mesurer l'expansion et la croissance des grandes structures jusqu'à aujourd'hui. Et ces mesures donnent le taux d'expansion de l'Univers actuel, la constante de Hubble.

En 2003, WMAP a réalisé sa première mesure de H_0 , 72 ± 5 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Parfait! Cette valeur était compatible avec celle du télescope Hubble, avec l'avantage d'une barre d'erreurs plus petite. Mais les mesures successives de WMAP ont révélé une fâcheuse tendance à la baisse (70 en 2011). Ce n'était pas encore un problème: les incertitudes de SH0ES et WMAP se recouvraient encore autour de 72 kilomètres par seconde et par mégaparsec.

LA CRISE S'INSTALLE

Mais en 2013, les barres d'erreur se réduisaient encore et se touchaient à peine: le résultat de SH0ES était de 74 ± 2 et celui de WMAP 70 ± 2 . Le climat n'était pas encore à l'inquiétude, les deux méthodes étant encore compatibles avec une valeur d'environ 72. Avec l'amélioration des méthodes d'analyse et des techniques, on s'attendait à voir les valeurs converger.

C'est alors, en 2014, que le successeur de WMAP, l'observatoire spatial *Planck*, a annoncé

sa première estimation de la constante de Hubble: $67,4 \pm 1,4$. Les incertitudes ne se recouvraient plus, l'écart était même bien marqué. Et les résultats suivants de *Planck* n'ont fait que confirmer ce résultat. Pire, la barre d'erreur est tombée à 1, puis, en 2018, elle n'était plus que de 0,5.

Dans le jargon scientifique, on parle alors de «tension» pour décrire ce genre de situation où deux mesures sont inconciliables. C'était d'ailleurs le titre d'une conférence à l'institut Kavli de physique théorique, à Santa Barbara, en Californie, à l'été 2019: «Tensions entre l'Univers jeune et l'Univers actuel». Adam Riess était le premier à présenter ses résultats. À la fin de son séminaire, il s'est tourné vers David Gross, spécialiste de la physique des particules et lui aussi Prix Nobel, et lui a demandé ce qu'il en pensait: «Avons-nous une tension ou avons-nous un problème?»

UNE CONFÉRENCE SOUS TENSION

David Gross a d'abord prudemment répondu que la nuance est un peu «arbitraire», avant d'ajouter: «mais oui, je pense qu'on peut parler de problème». Vingt minutes plus tard, après la séance de questions, il a amendé sa remarque: «En physique des particules, on ne parlerait ni de tension ni de problème, mais plutôt de crise.» Adam Riess a conclu la discussion sur ces mots: «Chers collègues, nous sommes en situation de crise.»

Le problème vient-il de la construction de l'«échelle cosmique des distances» à partir des chandelles standard? Une telle échelle s'étendant de plus en plus loin dans l'Univers est aussi robuste que chacun de ses échelons, les chandelles standard. Il n'est pas impossible que des erreurs se cachent dans cette approche.

Lors de la conférence à l'institut Kavli, ce point a été longuement débattu. Pendant la conférence, Wendy Freedman et son équipe ont publié un résultat très différent de celui de SHOES en utilisant un autre type de chandelle

standard: certaines étoiles géantes rouges. Celles-ci brillent de plus en plus jusqu'à atteindre un pic quand l'hélium de leur cœur commence à fusionner. Ce «flash d'hélium» commun à toutes les géantes rouges peut servir de chandelle standard. Par cette approche, l'équipe de Chicago est parvenue à une valeur qui se trouve à mi-distance de l'intervalle défini par la crise actuelle: $69 \pm 0,8$ kilomètres par seconde et par mégaparsec (une valeur qui n'offre aucun recouvrement des incertitudes, ni avec SHOES ni avec *Planck*).

L'idée de Wendy Freedman est que les céphéides ne sont pas des chandelles standard très fiables. On trouve ces étoiles dans des régions denses en astres et souvent riches en poussière. Or cette dernière, en occultant une partie de la lumière des étoiles, donne l'impression qu'elles sont plus distantes qu'elles ne le sont réellement. À l'inverse, les géantes rouges sont de vieilles étoiles que l'on trouve plutôt en périphérie de la Galaxie, dans des régions pauvres en poussière.

Pour certains spécialistes de l'approche par l'échelle des distances, la date de publication de l'article de Wendy Freedman a été vécue comme une provocation, car elle ne leur laissait pas le temps d'analyser la méthode pour y apporter une réponse circonstanciée lors de la conférence.

Cette réponse est venue trois semaines plus tard. La méthode utilisée par l'équipe de Wendy Freedman «constitue une chandelle standard prometteuse pour mesurer les distances extragalactiques», commencent de façon très diplomatique les auteurs de l'article avant de s'attaquer vivement à l'analyse des erreurs systématiques. De leur point de vue, le résultat de Wendy Freedman était entaché d'incertitudes. En particulier, les astronomes avaient calibré leurs géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie dont la distance est bien connue mais qui est très poussiéreuse. En réinterprétant les données sur les géantes rouges, Adam Riess et ses collègues trouvaient un bon accord avec leurs propres données: ils en déduisaient une constante de Hubble égale à $72,4 \pm 1,9$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Pour Wendy Freedman, cette réinterprétation de sa méthode était inexacte. Avec son équipe, elle a pris en compte les critiques. Et en février 2020, ces chercheurs ont publié de nouveaux résultats en utilisant aussi des calibrages de géantes rouges dans deux autres galaxies, IC 1613 et le Petit Nuage de Magellan, peu poussiéreuses mais dont les distances sont moins bien connues. L'équipe de Wendy Freedman a vérifié qu'ils arrivaient correctement à prendre en compte l'effet de la poussière et avaient des résultats cohérents. Mais au lieu de se rapprocher de la valeur de SHOES, >

En physique des particules, on parlerait plutôt de crise

David Gross

> leur nouvelle valeur pour la constante de Hubble s'en écarte encore plus: $69,6 \pm 1,9$ kilomètres par seconde et par mégaparsec, à un jet de pierre de la valeur donnée par *Planck*. Adam Riess et ses collègues continuent d'examiner la méthode.

Ces échanges, parfois animés, entre les astronomes qui s'appuient sur des chandelles standard confortent les physiciens des particules dans l'idée que le problème prend sa source dans les incertitudes de la construction de l'échelle cosmique des distances. Mais comment affirmer que les analyses du fond diffus cosmologique sont exemptes d'erreurs? Peu d'astronomes pensent que le problème se situe dans les données de *Planck*. Les physiciens estiment d'ailleurs avoir atteint le seuil de sensibilité maximal pour des observatoires spatiaux étudiant le fond diffus cosmologique. Et des mesures indépendantes du fond diffus – par le télescope du pôle Sud (*SPT*) par exemple – confirment la robustesse de ces mesures.

Dès lors, si la source de la tension n'est pas dans les observations de l'Univers jeune ou actuel, alors les cosmologistes n'ont pas d'autres solutions que de se pencher sur la troisième piste, celle d'une «nouvelle physique», c'est-à-dire des forces ou phénomènes dont l'explication échappe à notre compréhension actuelle du monde. Les cosmologistes ont commencé à considérer des idées radicales selon lesquelles le modèle standard de la cosmologie n'est pas aussi complet qu'ils le pensaient.

Un élément qui pourrait jouer sur notre compréhension de l'expansion cosmique est l'incertitude sur le contenu en particules de l'Univers. Pour certains scientifiques, cette idée n'est pas sans rappeler le «problème des neutrinos solaires», une querelle qui a duré plusieurs décennies à propos des neutrinos électroniques, des particules émises notamment par le Soleil.

Les théoriciens avaient calculé un certain flux de neutrinos, les détecteurs enregistraient un autre. Les physiciens suspectaient qu'il s'agissait d'erreurs systématiques dans les observations. Les astronomes mettaient en question la théorie décrivant les processus de production de neutrinos au cœur du Soleil. Comme pour la constante de Hubble, aucune solution ne semblait émerger, ni d'un côté ni de l'autre. Jusqu'à ce que, à la fin du millénaire, des chercheurs découvrent que les neutrinos ont une masse. En prenant en compte ce résultat, les physiciens ont compris que les neutrinos «oscillaient» d'une identité à une autre: les neutrinos électroniques se transformaient de façon cyclique en d'autres types de neutrinos auxquels les détecteurs n'étaient pas sensibles. Un ajustement similaire, par exemple une nouvelle variété de neutrinos présents dans l'Univers jeune, qui modifierait

Le modèle standard de la cosmologie n'est peut-être pas aussi complet qu'on le pensait

la distribution de l'énergie et des masses dans le plasma primordial, apporterait une correction à la valeur de la constante de Hubble.

Une autre piste concerne l'énergie sombre. Dans le modèle standard de la cosmologie, on considère que la densité de l'énergie sombre est constante. Mais ce n'est pas nécessairement le cas. Dès lors, l'influence de cette forme d'énergie sur l'expansion de l'Univers a pu varier au cours du temps. Une idée qui n'est pas déraisonnable, dans la mesure où les cosmologistes ne connaissent pas la nature exacte de cette composante de l'Univers.

DES DONNÉES À VENIR

Dans les deux prochaines années, les astronomes disposeront de données recueillies par l'observatoire spatial *Gaia*, de l'Agence spatiale européenne. Celui-ci mesure avec une précision jamais atteinte la distance de plus d'un milliard d'étoiles dans la Voie lactée. Cela permettra de vérifier que les chercheurs utilisent les bonnes valeurs pour calibrer le premier échelon de leur édifice cosmique. Si ce n'est pas le cas, le problème aura bien été celui d'une erreur systématique. Pendant ce temps, les théoriciens continuent à travailler sur de nouvelles extensions du modèle du Big Bang, même si, jusqu'à présent, aucun modèle concurrent ne résiste mieux que la version standard à un examen poussé.

Le modèle standard de la cosmologie reste l'un des plus grands succès de la science moderne. En cinquante ans, ce cadre a évolué, partant de vagues idées spéculatives pour donner des idées quasi certaines. Il n'est peut-être pas aussi complet que les cosmologistes le pensaient il y a à peine quelques années, mais il reste un bon exemple du bon fonctionnement de la science: les chercheurs obtiennent des résultats dont ils éprouvent la fiabilité, cherchent de nouvelles pistes et poursuivent chaque indice pour avancer. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. L. Freedman et al., **Calibration of the tip of the red giant branch (TRGB)**, à paraître dans *Astrophys. J.*, 2020.

W. L. Freedman et al., **The Carnegie-Chicago Hubble program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch**, *Astrophys. J.*, vol. 882(1), article 34, 2019.

A. G. Riess et al., **Large Magellanic Cloud cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM**, *Astrophys. J.*, vol. 876(1), article 85, 2019.

Collab. *Planck*, **Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters**, en ligne le 17 juillet 2018.

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA

SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

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 pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

29 %
de réduction *

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

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: pouirlascience@abopress.fr

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

PAG20STD

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
-29 %

DPV4E90

☐ **FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE**

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

6,50€
PAR MOIS
-31 %

PPV6E50

☐ **FORMULE
INTÉGRALE**

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€
PAR MOIS
-43 %

IPV8E20

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

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)

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.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@pouirlascience.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

4/ **MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

FRÉDÉRIC COURBIN

est professeur au laboratoire d'astrophysique de l'EPFL, l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse. Il participe au projet international *HOLICOW* (H_0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring) pour mesurer la constante de Hubble et est l'un des fondateurs du programme *TDCOSMO*.



Constante de Hubble

La diversité des méthodes de mesure enrichit le débat

Pour sortir de la crise provoquée par les mesures de la constante de Hubble, de nombreux chercheurs développent des méthodes de mesure indépendantes de celles utilisées jusqu'ici. Tour d'horizon avec Frédéric Courbin, astrophysicien à Lausanne.

Pouvez-vous nous rappeler brièvement l'origine de cette crise ?

Depuis sa naissance, l'Univers est en expansion, mais à une vitesse qui a varié au cours du temps. La constante de Hubble, notée H_0 , indique le taux d'expansion actuel. L'astronome américain Edwin Hubble, à la fin des années 1920, a été le premier à estimer la constante qui porte son nom. Son résultat était très approximatif, mais aujourd'hui, grâce à l'amélioration des techniques, des méthodes reposant sur des principes différents donnent des valeurs dans un intervalle très resserré. Cela prouve que nous comprenons globalement bien comment l'Univers fonctionne. Cependant, même si ces valeurs sont proches, certaines sont incompatibles entre elles (voir l'article de Richard Panek dans ce numéro). En l'état, nous ne pouvons ni expliquer ni ignorer ces différences.

Quel est l'enjeu ?

Les deux méthodes les plus connues pour mesurer H_0 utilisent des approches diamétralement opposées. La première construit échelon après échelon une échelle de distance en partant de l'univers local et en établissant une relation vitesse-distance liée au taux d'expansion. L'autre méthode utilise le fond diffus cosmologique, le rayonnement émis par l'Univers quand il avait 380 000 ans. L'idée est de partir d'une référence de longueur dans l'Univers jeune et de suivre son évolution en revenant vers le présent. Pour cela, il faut se donner un modèle cosmologique qui fournit les ingrédients pour décrire l'histoire de l'Univers. Les cosmologistes sont alors à même de calculer H_0 . Si le modèle est correct et si la construction de l'échelle des distances a été bien faite, les deux méthodes devraient converger vers la même valeur de H_0 ... et ce n'est pas le cas ! Où est l'erreur ? Dans les mesures, les analyses ou dans le modèle cosmologique ? C'est ce que nous devons déterminer.

Quelles pourraient être les sources d'erreur dans, par exemple, l'analyse du fond diffus cosmologique ?

L'Univers primordial était rempli d'un plasma chaud (des protons et des électrons libres liés aux photons), parcouru d'ondes, dites « acoustiques », qui ont créé des zones de surdensité de matière. Ces ondes se propageaient à une vitesse caractéristique qui fournit une référence de longueur correspondant à peu près à la distance que les ondes ont parcourue depuis le Big Bang en 380 000 ans. À ce moment, le plasma est devenu assez froid pour que les protons et les électrons s'associent et forment des atomes neutres. Les photons se sont alors échappés, ce qui a donné le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement isotrope et

quasi homogène correspond à une température de 2,7 kelvins. Mais les surdensités de matière ont provoqué de petites fluctuations de température, mesurées avec précision par le satellite *Planck*. À partir des caractéristiques statistiques de ces fluctuations, les cosmologistes déduisent des informations sur les conditions ayant régné dans l'Univers primordial. Ensuite, avec le modèle cosmologique standard, ils extrapolent l'histoire de l'expansion cosmique et calculent la constante de Hubble, à l'époque actuelle. La collaboration *Planck* a ainsi obtenu $H_0 = 67,4$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Les mesures de *Planck* sont très fiables. C'est plutôt dans l'interprétation des données qu'un problème pourrait se nicher. D'abord, il y a le modèle cosmologique qui est éventuellement à reconsidérer. Celui-ci intègre des éléments comme l'énergie sombre, qui explique que l'expansion cosmique accélère mais dont la nature n'est pas connue. Et cette dernière influe sur la valeur calculée de H_0 .

Autre piste, la vitesse du son dans le plasma primordial est peut-être mal évaluée. Pour la déterminer, la collaboration *Planck* a fait quelques hypothèses simplificatrices qui étaient alors raisonnables : absence de turbulences et de champ magnétique dans le plasma. Mais si ces hypothèses sont incorrectes, la vitesse du son change, la référence de distance aussi et, par ricochet, H_0 serait à réévaluer. On a intérêt aujourd'hui à travailler avec des spécialistes des plasmas pour étudier des conditions plus réalistes de l'Univers primordial.

Et comment fonctionne la méthode de l'échelle des distances ?

L'idée est de construire la relation, pour différents objets dans l'Univers, entre leur distance et leur vitesse de récession (c'est-à-dire leur vitesse d'éloignement due à l'expansion cosmique). En établissant cette relation sur une longue plage de distances, on peut extrapoler jusqu'à aujourd'hui et estimer finement H_0 .

Il est assez simple de mesurer la vitesse d'un objet grâce au *redshift*, c'est-à-dire le décalage du spectre vers les grandes longueurs pour un objet s'éloignant de nous à cause de l'expansion de l'Univers. Plus un objet s'éloigne vite et plus le *redshift*, ou décalage vers le rouge, est important.

Mais mesurer la distance est autrement plus difficile. Il faut utiliser des références qu'on établit de proche en proche. On commence par la parallaxe, une méthode géométrique : si l'on observe une étoile au cours de l'année, elle semble changer de position du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil ; par un calcul de trigonométrie, on estime alors la distance de l'étoile. Cela fonctionne pour des étoiles assez proches, car plus elles sont lointaines, plus le changement de position est petit et difficile à mesurer.

> Cette approche sert alors à calibrer les céphéides. En 1912, l'astronome américaine Henrietta Swan Leavitt a découvert que la périodicité de ces étoiles variables était reliée à leur luminosité intrinsèque. On peut déterminer la distance des céphéides proches par la méthode de la parallaxe et ainsi déduire de leur luminosité apparente (celle qu'on mesure) leur luminosité intrinsèque; cela permet de calibrer la relation périodicité-luminosité intrinsèque. On utilise ensuite cette relation pour déterminer la luminosité intrinsèque des céphéides plus lointaines, ce qui, en comparant à leur luminosité apparente, fournit leur distance. Pour cette raison, les céphéides sont qualifiées de « chandelles standard ».

Ces étoiles atteignent une luminosité 100 000 fois supérieure à celle du Soleil et sont alors visibles jusqu'à environ 130 millions d'années-lumière. Pour aller au-delà, on utilise les céphéides pour calibrer les supernovæ de type Ia, des explosions d'étoiles très lumineuses (10 milliards de fois la luminosité du Soleil) dont on connaît aussi une relation qui donne accès à leur luminosité intrinsèque. Par cette méthode, on reconstruit l'échelle des distances dans l'Univers.

Au sein du projet *SHoES*, Adam Riess, de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé cette technique et obtiennent $H_0 = 73$ kilomètres par seconde et par mégaparsec. Mais si l'on prend en compte les incertitudes, cette valeur est incompatible avec celle obtenue par la collaboration *Planck*.

À quel point le calibrage est-il maîtrisé dans cette approche ?

Le calibrage est vraiment crucial. Une incertitude dans les mesures de parallaxe se propagerait sur toute l'échelle des distances et introduirait des erreurs systématiques dans le calcul de H_0 . Actuellement, le satellite *Gaia* mesure la parallaxe avec une extrême précision pour des millions d'étoiles (dont des céphéides) dans la Voie lactée et les nuages de Magellan. Ce catalogue de mesures sera utilisé pour améliorer les résultats.

Beaucoup de distances sont aussi calibrées avec des objets situés dans le Grand Nuage de Magellan. Les incertitudes quant à la distance de cette galaxie naine proche de la Voie lactée ont été réduites en 2019 en utilisant une méthode originale reposant sur des systèmes binaires d'étoiles.

Une autre méthode permet de mesurer précisément la distance de galaxies. Elle repose sur un phénomène d'émission laser microonde (ou maser). Cette technique a été utilisée pour la galaxie NGC 4258, située à 23,5 millions d'années-lumière. Ces émissions sont cependant très rares. Elles sont dues à des molécules d'eau de nuages moléculaires dans des environnements très énergétiques comme des noyaux ac-

MAÎTRISER LES INCERTITUDES DE MESURE

Pour déterminer la valeur d'une grandeur physique, on effectue en général plusieurs mesures. La moyenne des résultats obtenus donne une estimation de cette grandeur. Cependant, il faut tenir compte des incertitudes qui sont de deux types : les erreurs statistiques et les erreurs systématiques. Les premières sont liées au nombre de mesures réalisées. Par exemple, si l'on effectue un sondage auprès

d'une personne, il y a peu de chance que sa réponse soit représentative de celle de la population entière. Il faut donc augmenter le nombre de personnes sondées pour réduire les erreurs statistiques. Cela se traduit par une diminution des barres d'erreur.

L'erreur systématique est plus subtile. Elle est par exemple liée à un défaut dans le protocole de mesure (si un instrument est mal étalonné par exemple) qui induit un biais sur chacune des mesures. Cela se répercute sur la valeur moyenne, et elle ne diminue pas en effectuant davantage de mesures. Cette erreur peut parfois être estimée, mais pas toujours, notamment si certaines sources d'erreurs n'ont pas été prises en compte (parce que le modèle n'est pas le bon, parce qu'il fait des hypothèses trop simplificatrices, etc.).

Dans le cas de la constante de Hubble, les chercheurs passent beaucoup de temps à analyser leurs sources d'incertitudes. Des erreurs systématiques pourraient ainsi expliquer la crise actuelle.

SEAN BAILLY
Pour la Science

tifs de galaxies. Par ailleurs, en utilisant directement ces masers dans quatre galaxies, des chercheurs ont estimé H_0 à 74,8 kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Quelles sont les autres méthodes de mesure de H_0 ?

D'autres types d'étoiles ont été proposés comme chandelles standard et jouent un rôle similaire aux céphéides. Par exemple, l'équipe de Wendy Freedman, de l'université de Chicago, étudie une sous-population particulière des étoiles géantes rouges. Elle obtient une estimation de H_0 assez basse pour une technique qui construit l'échelle des distances cosmiques : 69,6 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Cette valeur se trouve à mi-chemin entre celles de *Planck* et de *SHoES*.

Une autre piste utilise les étoiles de type Mira, des géantes rouges variables. L'avantage de ces astres sur les céphéides est qu'ils sont beaucoup plus nombreux. On peut donc espérer avoir de meilleures analyses statistiques. Les premiers résultats donnent $H_0 = 73,3$ kilomètres par seconde et par mégaparsec.

Il existe encore d'autres façons de construire l'échelle des distances. On constate qu'à l'exception des géantes rouges de Wendy Freedman, elles convergent toutes (parfois avec des barres d'erreur encore assez grandes) vers une valeur compatible avec celle de *SHoES*.

Quelle est la fiabilité des chandelles standard ?

C'est une question difficile. Les relations qui donnent la luminosité intrinsèque sont-elles réellement universelles ? Une céphéide brille-t-elle de la même façon dans toutes les galaxies ? En effet, les galaxies n'ont pas toutes la même métallicité (le contenu en éléments plus lourds que l'hydrogène, l'hélium et le lithium). La composition des étoiles y est donc différente, ce qui peut influencer leur comportement. Même question pour les supernovæ : explosaient-elles de la même façon dans l'Univers plus jeune ?

Valider ces hypothèses est un défi majeur. Plus on regarde loin dans l'Univers et plus il est difficile de détecter des supernovæ. Il faut regarder dans la bonne direction, au bon moment. Les futurs grands instruments comme le télescope spatial *James-Webb*, l'*E-ELT* (le futur observatoire géant que l'Europe construit au Chili) ou l'observatoire *Vera-Rubin* (nouveau nom du *LSST*) amélioreront la situation, mais ne permettront probablement pas de confirmer l'universalité des chandelles standard.

Existe-t-il d'autres méthodes qui soient indépendantes de ces chandelles standard ?

Une toute nouvelle méthode consiste à utiliser les ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, ondes que la collaboration *Ligo-Virgo* a détectées pour la première fois en 2017. On parle de « sirènes standard » ! L'amplitude des ondes gravitationnelles captées permet de déterminer la distance de l'événement. Et contrairement à la coalescence de deux trous noirs, l'événement s'accompagne d'une émission intense d'ondes électromagnétiques dont on déduit, grâce au *redshift*, la vitesse de récession de la paire d'étoiles. Avec seulement six fusions de ce type détectées pour l'instant, la collaboration *Ligo-Virgo* a obtenu pour H_0 une estimation de 68 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Mais les barres d'erreur sont encore très grandes. Les spécialistes de cette méthode estiment qu'il faudrait une cinquantaine d'événements pour avoir une valeur compétitive.

Cette technique est encore assez jeune. Il se pose beaucoup de questions sur sa robustesse. Par exemple, il faut déterminer avec précision la masse des étoiles qui ont fusionné pour connaître l'amplitude initiale, ce qui est loin d'être évident et dépend des modèles. Autre difficulté, les ondes gravitationnelles peuvent être amplifiées sur leur chemin, par un effet de lentille gravitationnelle ; la coalescence peut alors paraître plus proche qu'elle ne l'est en réalité.

Et vous, sur quelle méthode travaillez-vous ?

Dans notre projet *HoLiCOW*, l'idée est d'utiliser ce phénomène bien connu en

relativité générale qu'est la lentille gravitationnelle. Prenez un objet lointain comme un quasar (une galaxie au noyau très actif et émettant beaucoup de lumière) et imaginez qu'une galaxie très massive se trouve sur la ligne de visée. Celle-ci agit comme une lentille dans un dispositif optique. En déformant l'espace-temps dans son voisinage, la galaxie-lentille dévie la lumière du quasar qui passe près d'elle et la focalise vers nous. La lumière nous parvient en suivant différents chemins de longueurs différentes, ce qui se manifeste par des images multiples du quasar. Quand la lumière du quasar fluctue, celle de ses images aussi, mais en décalé dans le temps (de plusieurs mois ou plus), car les chemins parcourus par la lumière ne sont pas de même longueur. En 1964, Sjur Refsdal a montré qu'il est possible d'exprimer la constante de Hubble en fonction de ce délai temporel et du *redshift*.

L'analyse est complexe, car divers phénomènes perturbent la mesure du délai temporel. Il faut aussi modéliser de la façon la plus réaliste possible la distribution de masse de la galaxie-lentille pour reproduire correctement le champ gravitationnel de la lentille qui, par dilatation du temps, influe sur le délai. Enfin, il faut aussi tenir compte de la matière présente sur le parcours de la lumière.

Qui plus est, de telles configurations de lentilles pour un quasar sont rares. Nous en avons étudié sept avec précision. Nous avons obtenu des valeurs de la constante de Hubble toutes très voisines, ce qui nous donne confiance en notre méthode d'analyse. Notre estimation est d'environ 73,3 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Ce résultat est très proche de celui de *SHoES*. Avec les instruments d'observation à venir, nous espérons exploiter 50 quasars d'ici à quelques années. C'est l'objectif du nouveau consortium international *TDCOSMO* (*Time delay cosmography*).

Peut-on espérer que la crise cosmologique sera bientôt résolue ?

Aujourd'hui, la diversité de méthodes indépendantes de mesure de H_0 , avec des erreurs systématiques de natures différentes, enrichit le débat. Nous ne savons pas encore expliquer tous les écarts dans les mesures, mais, en comparant méticuleusement ces approches, nous devrions bientôt commencer à y voir plus clair.

Si le désaccord persiste, il faudra probablement repenser les modèles. Différentes pistes existent – les conditions dans le plasma primordial, la nature de l'énergie sombre, et bien d'autres. Nous avons même trop de solutions : pour l'instant, nous avons une serrure, mais toutes les clés fonctionnent. Nous ne savons pas encore laquelle est la bonne !

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

K. C. Wong et al., **HoLiCOW XIII. A 2.4 % measurement of H_0 from lensed quasars : 5.3 σ tension between early and late-Universe probes**, à paraître dans *MNRAS*, 2020. (prépublication sur arXiv).

A. G. Riess et al., **Large Magellanic Cloud cepheid standards provide a 1 % foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM**, *Astrophys. J.*, vol. 876(1), article 85, 2019.

W. L. Freedman et al., **The Carnegie-Chicago Hubble program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch**, *Astrophys. J.*, vol. 882(1), article 34, 2019.

L'ESSENTIEL

> L'utilisation de la valeur- p , qui sert depuis près d'un siècle à jauger la qualité statistique de résultats expérimentaux, a donné une fausse illusion de certitude et a mené à des crises de reproductibilité dans de nombreux champs scientifiques.

> Refonte totale ou simples aménagements ? Malgré

le consensus grandissant pour une réforme de l'analyse statistique, les chercheurs sont en désaccord sur l'ampleur à lui donner.

> Diverses pistes sont envisagées, mais une chose est sûre : il est temps pour les scientifiques et le grand public d'accepter l'inconfort du doute.

L'AUTRICE



LYDIA DENWORTH
journaliste
scientifique
à New York,
aux États-Unis

La valeur- p : un problème significatif

Les méthodes statistiques pour jauger la pertinence d'un résultat expérimental sont attaquées de toutes parts. Résisteront-elles ?

En 1925, le généticien et statisticien britannique Ronald Fisher publiait un livre intitulé *Statistical Methods for Research Workers* (*Les Méthodes statistiques adaptées à la recherche scientifique*). Il n'avait *a priori* rien d'un best-seller, pourtant il remporta un énorme succès et installa Fisher comme le père des statistiques modernes. Dans l'ouvrage, Fisher expliquait aux chercheurs comment utiliser les statistiques pour éprouver la robustesse de leurs conclusions, afin qu'ils puissent décider ou non de donner une suite à leurs travaux. Fisher y décrivait notamment un test qui examinait la compatibilité des résultats avec un modèle et produisait en sortie un nombre : la valeur- p ou p -valeur (*p-value* en anglais). Il fixa un seuil à $p = 0,05$: « Il est commode de prendre ce point comme limite pour juger si une déviation [par rapport au modèle] doit être considérée comme significative ou non. » Fisher conseillait aux chercheurs de poursuivre leurs travaux s'ils obtenaient des valeurs- p en deçà.

Ainsi naissait l'idée qu'une valeur- p inférieure à 0,05 apposait le sceau « statistiquement significatif » sur des recherches.

Aujourd'hui, presque un siècle plus tard, une valeur- p inférieure à 0,05 est considérée comme la référence pour jauger la qualité statistique d'une expérience. Elle ouvre aux chercheurs les portes du monde académique – au financement et à la publication – et dès lors détermine en partie la majorité des résultats scientifiques publiés. Mais même Fisher avait conscience des limites de ce critère statistique. La plupart de ces travers sont connus depuis des décennies. « Le recours excessif aux tests de pertinence statistique, écrivait le psychologue américain Paul Meehl en 1978, est une façon appauvrie de faire de la science. » La valeur- p est fréquemment mal interprétée et l'on a tendance à oublier qu'un résultat statistiquement significatif n'est pas forcément significatif en pratique.

En outre, la méthodologie pratiquée dans les laboratoires donne la possibilité aux expérimentateurs, consciemment ou non, d'augmenter >



> ou diminuer artificiellement une valeur- p . « Comme on le dit souvent, vous pouvez prouver tout et son contraire avec les statistiques », explique le statisticien et épidémiologiste Sander Greenland, professeur émérite à l'université de Californie à Los Angeles et l'une des principales voix qui appellent à une réforme du système. Les études qui visent seulement à être statistiquement significatives produisent régulièrement des affirmations inexactes – elles donnent l'apparence du vrai au faux et *vice versa*. Quand Fisher a pris sa retraite, on lui a demandé si sa longue carrière lui inspirait un regret : « Avoir mentionné 0,05 », aurait-il confié.

DE NOMBREUSES FAILLES

Au cours de la dernière décennie, le débat sur les tests de robustesse s'est enflammé. Une publication a qualifié les fragiles fondations de l'analyse statistique de « secret le plus sale de la science ». Une autre a dénoncé de « nombreuses et profondes failles » dans ces tests. Une crise majeure a secoué l'économie expérimentale, la recherche biomédicale et surtout la psychologie lorsqu'on a découvert qu'une proportion substantielle des résultats publiés dans ces disciplines n'étaient pas reproductibles. Un des exemples les plus célèbres est l'idée qu'adopter une posture de victoire (les bras en V) donnerait non seulement du courage, mais altérerait la composition du sang en hormones, ce qui revient à affirmer que le langage corporel influe sur le fonctionnement biologique ; ce pseudo-résultat, qui reposait sur une unique publication, a depuis été invalidé par l'un de ses auteurs.

De même, un article sur l'économie du changement climatique (écrit par un climatoseptique) « s'est retrouvé avec presque autant d'erreurs corrigées que de données brutes – sans blague ! –, sans qu'aucune de ces erreurs amène l'auteur à revoir sa conclusion », dénonce Andrew Gelman, statisticien de l'université Columbia, à New York, sur son blog, où il pourfend la mauvaise science et dénonce la difficulté des chercheurs à reconnaître leurs erreurs.

Il est devenu clair que la notion de résultat significatif est l'une des sources du problème, même si ce n'est pas la seule. Ces trois dernières années, les scientifiques ont en masse appelé à une réforme urgente du système. L'association américaine de statistique, qui a publié une déclaration forte et inhabituelle sur la question en 2016, plaide pour le « passage au monde d'après $p < 0,05$ ». Ronald Wasserstein, le directeur de l'association, résume avec humour le problème : « La significativité statistique d'un résultat ne devrait pas avoir plus d'importance qu'un *swipe* vers la droite dans Tinder. Elle indique seulement le niveau d'intérêt qu'on lui porte. Malheureusement, elle est devenue tout autre chose. Les gens disent : 'Je »

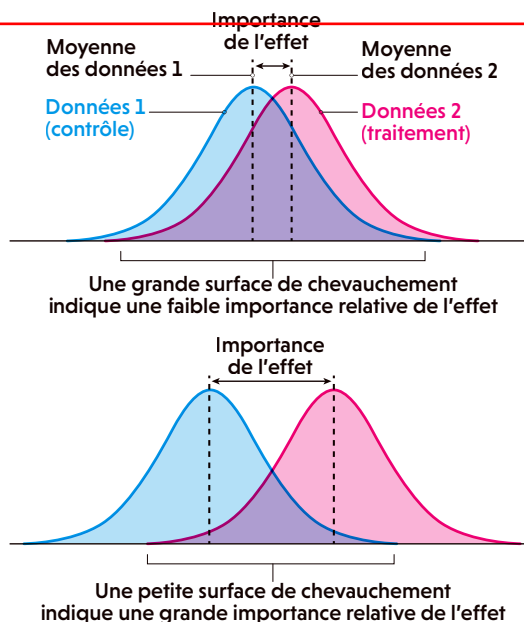
LA SIGNIFICATIVITÉ STATISTIQUE

Imaginez que vous cultivez des citrouilles dans votre jardin. L'emploi d'engrais améliorera-t-il leur croissance ? D'après votre longue expérience sans fertilisant, vous savez que le poids des citrouilles varie et en connaissez la valeur moyenne : 4,5 kg. Vous décidez de cultiver un échantillon de 25 citrouilles avec engrais. À maturité, leur poids moyen s'élève à 6 kg. Comment déterminer si l'écart de 1,5 kg par rapport au poids moyen sans engrais est dû au hasard – hypothèse dite « nulle » – ou au fertilisant ?

La solution du statisticien Ronald Fisher implique d'effectuer une expérience de pensée : supposez que vous cultiviez 25 citrouilles un grand nombre de fois. À chaque fois, le poids moyen des citrouilles différerait en raison de leur variabilité individuelle. Ensuite, vous traceriez la répartition de ces valeurs moyennes, soit la répartition des poids moyens des citrouilles, centrée sur la valeur correspondant à l'hypothèse nulle (4,5 kg). Il s'agit alors de considérer la probabilité – la valeur- p – d'obtenir le poids moyen issu de votre expérience avec engrais (6 kg) si l'engrais n'avait eu aucun effet. Par convention, le seuil de significativité a été fixé à 0,05. Ici, il s'agit donc de déterminer si, dans la répartition ainsi construite, la probabilité d'obtenir un poids moyen de 6 kg est inférieure à 0,05. Mais d'autres approches existent.

L'IMPORTANCE DE L'EFFET

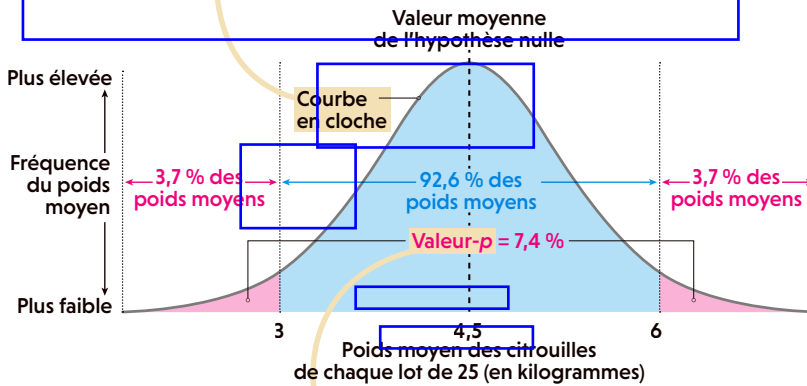
L'importance de l'effet d'un traitement est une grandeur statistique qui évalue l'écart entre les résultats moyens obtenus avec traitement et sans (expérience contrôle). Dans l'exemple des citrouilles, l'importance de l'effet se mesure en kilogrammes. Mais dans de nombreuses situations – comme des réponses à des questionnaires en psychologie –, il n'existe pas d'unité naturelle. Dans ce cas, les chercheurs recourent souvent à l'importance relative de l'effet. Une façon de mesurer celle-ci est fondée sur l'ampleur du chevauchement des distributions des données avec et sans traitement.



LA VALEUR-P

Pour calculer la valeur-p, on compare le poids moyen des 25 citrouilles cultivées avec engrais (6 kg) avec la répartition des poids moyens que l'on aurait obtenue en cultivant de nombreuses fois 25 citrouilles sans fertilisant.

La répartition du poids moyen des citrouilles, obtenue après de multiples cultures sans engrais de lots de 25, est une courbe en cloche centrée sur la valeur de l'hypothèse nulle.

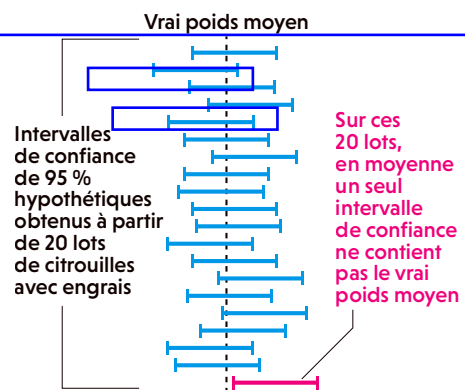


La valeur-p est ici la probabilité d'obtenir un lot de 25 citrouilles de poids moyen aussi éloigné du poids standard (4,5 kg) que celui que vous avez obtenu avec engrais (6 kg). Cela revient à calculer la probabilité que le poids moyen des citrouilles d'un lot soit supérieur à 6 kg ou inférieur à 3 kg. Ici, cette probabilité est 0,074. Cette valeur surpassant 0,05, votre résultat ne serait pas considéré comme significatif et l'engrais serait disqualifié.

L'exemple montre un « test bilatéral », où la valeur-p représente la probabilité d'obtenir un poids moyen supérieur à 6 kg et inférieur à 3 kg. Dans certaines circonstances, un chercheur pourrait choisir de réaliser un « test unilatéral ». Dans ce cas, la valeur-p serait de 0,037, donc inférieure à 0,05, ce qui est considéré comme statistiquement significatif. Voici une situation typique où, selon son intention, l'expérimentateur peut déboucher sur plusieurs valeurs-p à partir des mêmes données.

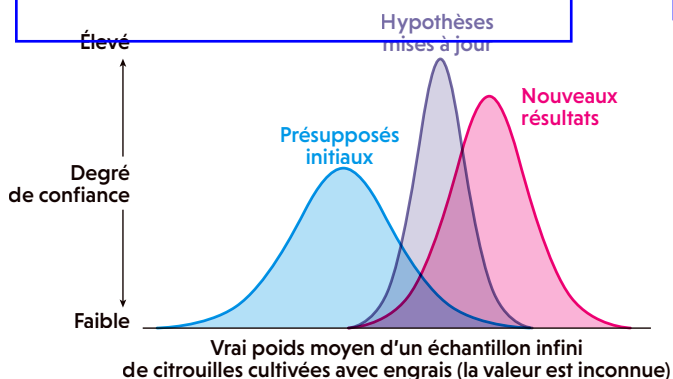
L'INTERVALLE DE CONFIANCE

Il est possible de calculer un intervalle de confiance de 95 % à partir des données de notre échantillon de 25 citrouilles. Cela revient à deviner le poids moyen des citrouilles avec engrais. Pour cela, on inverse le calcul de la valeur-p afin de déterminer tous les poids moyens hypothétiques qui produisent une valeur-p supérieure ou égale à 0,05. Pour notre échantillon, l'intervalle de confiance de 95 % s'étend de 4,4 à 7,5 kilogrammes. Le « vrai » poids moyen des citrouilles avec engrais peut se situer ou non dans cet intervalle. Que signifie, alors, ce « 95 % » ? Imaginez ce qui se passerait si l'on cultivait de façon répétée des lots de 25 citrouilles avec engrais. Chaque lot fournirait un intervalle différent et aléatoire. Mais à long terme, 95 % de ces intervalles incluraient le « vrai » poids moyen et 5 % non. Et l'intervalle calculé à partir de notre propre échantillon de départ ? On ne peut savoir s'il se trouve parmi les 95 % qui ont fonctionné ou non. On sait juste que le procédé est correct 95 % du temps.



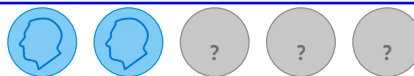
LA MÉTHODE BAYÉSIENNE

Dans la méthode d'inférence bayésienne, l'état d'incertitude d'une personne au sujet d'une quantité inconnue est représenté par une loi de probabilité. On utilise le théorème de Bayes pour combiner les présupposés initiaux – la répartition supposée avant d'examiner les données – avec l'information déduite des résultats. On obtient ainsi une nouvelle répartition, qui devient la nouvelle hypothèse de départ pour une prochaine étude, et ainsi de suite. Le choix de critères « objectifs » pour produire les présupposés initiaux est un sujet controversé. L'enjeu est de trouver des façons de construire mathématiquement les hypothèses de départ – des répartitiones *a priori* jugées comme raisonnables par une majorité de scientifiques.



LA SURPRISE

La valeur-p traduit l'étonnement que suscitent nos données sur les citrouilles si l'on suppose qu'en réalité l'engrais n'a aucun effet. Or certains chercheurs pensent que la valeur-p ne souligne pas cette surprise de façon assez intuitive. Ils prônent sa conversion en une quantité mathématique nommée... « surprise » (ou valeur-s ou transformation de Shannon : $s = -\log_2(p)$), qui produit des « bits d'information », ci-dessous illustrés par une expérience de jets de pièces de monnaie. Notre échantillon de 25 citrouilles avec engrais, de poids moyen 6 kg et de valeur-p 0,074, produit ainsi entre 3 et 4 bits de surprise (plus exactement $-\log_2(0,074) = 3,76$).



Deux faces d'affilée = 2 bits de surprise = valeur-p de $1/2^2 = 0,25$



Quatre faces d'affilée = 4 bits de surprise = valeur-p de $1/2^4 = 0,0625$



Cinq faces d'affilée = 5 bits de surprise = valeur-p de $1/2^5 = 0,03125$

> suis sous la barre des 0,05, c'est bon." Et la science s'arrête.»

La question maintenant est de savoir si les mentalités vont changer. «Il n'y a rien de neuf au fond. Cela doit nous faire envisager la possibilité que les mauvaises pratiques perdureront», observe Daniel Benjamin, spécialiste en économie comportementale à l'université de Californie du Sud, pourtant l'un des promoteurs de la réforme. Toutefois, même s'ils ont du mal à s'entendre sur le remède, nombre de chercheurs s'accordent à dire, comme l'économiste américain Stephen Ziliak l'a écrit, que «la culture actuelle du test de significativité statistique, son interprétation et son partage doivent cesser».

LE BOSON DE HIGGS: UN RESULTAT EXCEPTIONNELLEMENT ROBUSTE

Les chercheurs utilisent des modèles statistiques pour inférer la vérité – déterminer, par exemple, si un traitement thérapeutique est plus efficace qu'un autre ou si un groupe diffère d'un autre. Tout modèle statistique repose sur un ensemble de suppositions sur la façon dont les données sont collectées et analysées, et dont les chercheurs choisissent de présenter leurs résultats. Presque toujours, ces résultats sont fondés sur une approche dite «de l'hypothèse nulle», laquelle produit une valeur- p (voir l'encadré page 42). Problème: ce test n'aborde pas la vérité de front, mais de biais. «Ce que l'on veut connaître quand on fait une expérience, c'est la probabilité que l'hypothèse de départ soit vraie, explique Daniel Benjamin. Mais [l'approche de l'hypothèse nulle] répond à une autre question, alambiquée: si mon hypothèse était fausse, à quel point mes données seraient-elles improbables?»

Parfois, cette démarche porte ses fruits. La quête du boson de Higgs, une particule élémentaire théorisée par les physiciens dans les années 1960, est l'exemple extrême. L'hypothèse nulle était que le boson de Higgs n'existait pas. Les équipes du Grand collisionneur de hadrons (LHC), au Cern, à Genève, ont réalisé quantité d'expériences et ont fini par obtenir une valeur- p si faible que la probabilité que leurs résultats se réalisent, si le boson n'existait pas, était d'une chance sur 3,5 millions. Cela rendait l'hypothèse nulle intenable. Puis les chercheurs ont reproduit leurs résultats pour balayer tout risque d'erreur.

«La seule façon pour eux de s'assurer de l'importance scientifique du résultat, et du prix Nobel, était de montrer qu'ils avaient déployé un effort incommensurable pour écarter tous les problèmes capables de produire une si petite valeur, analyse Sander Greenland. Un tel nombre affirme que le modèle standard



sans le boson de Higgs est incorrect – et le crie haut et fort.»

Mais la physique autorise un niveau de précision inaccessible dans les autres disciplines. Dans des tests sur des humains, comme en psychologie, on n'atteint jamais des probabilités d'un sur trois millions. Une valeur- p de 0,05 signifie qu'il y a une chance sur 20 qu'une hypothèse correcte soit rejetée plusieurs fois lors d'une multitude de tests (et n'indique pas, comme on le croit souvent, que la probabilité d'erreur sur un test unique est de 5%). C'est pourquoi, jadis, les statisticiens énonçaient leurs résultats en ajoutant des «intervalles de confiance» – une façon d'estimer l'erreur ou l'incertitude dont ils ne pouvaient se départir.

Les intervalles de confiance sont mathématiquement reliés à la valeur- p . La valeur- p est comprise entre 0 et 1. Si vous soustrayez 0,05 à 1, vous obtenez 0,95, ou 95%, l'intervalle de confiance classique. Mais, au fond, un intervalle de confiance n'est qu'un moyen commode pour résumer les résultats des tests de certaines hypothèses. «Il n'y a rien [dans ces intervalles] qui devrait inspirer de la confiance», rappelle Sander Greenland. Pourtant, au fil du temps, la valeur- p et les intervalles de confiance ont tenu bon, offrant l'illusion de la certitude.

La valeur- p elle-même n'est pas nécessairement le problème. C'est un outil utile quand il est manié à bon escient. Le problème survient quand la significativité statistique des

résultats est exagérée, une situation qui se produit facilement avec de petits échantillons.

C'est l'origine de la crise actuelle de reproductibilité des expériences. En 2015, Brian Nosek, cofondateur du Center for open science, un organisme américain qui vise à favoriser l'intégrité de la recherche scientifique, a dirigé un effort collectif destiné à reproduire cent expériences majeures en psychologie sociale. Le résultat ? Seulement 36,1% de ces expériences ont pu être reproduites sans ambiguïté. En 2018, le *Social sciences replication project*, un projet mené par un consortium international de chercheurs, a dressé le bilan de la répétition de 21 études en sciences sociales qui avaient été publiées dans *Nature* et *Science* entre 2010 et 2015. Dans 13 études seulement (62% des cas), les nouveaux résultats allaient dans le sens de la conclusion de la publication originale, et l'« importance de l'effet » était en moyenne deux fois moindre. Cette grandeur statistique caractérise l'ampleur de l'écart obtenu par rapport à l'hypothèse nulle (voir l'encadré page 42).

La génétique a aussi connu sa crise de reproductibilité dans la première moitié des années 2000. Après un long débat, le seuil de significativité statistique a ainsi été considéra-

conduit parfois devant les tribunaux lorsque la responsabilité des entreprises et la sécurité des consommateurs sont en jeu.

Jusqu'à quel point la science vacille-t-elle ? Globalement, les scientifiques s'accordent sur le fait que le malentendu autour de la valeur p et son utilisation à tout-va sont de réels problèmes dans certaines disciplines. Toutefois, des chercheurs se montrent moins durs dans leur diagnostic. « Je vois les choses à long terme, déclare Blair Johnson, spécialiste en psychologie sociale à l'université du Connecticut. La science fonctionne par phases. Le pendule balance entre deux extrêmes, il faut bien vivre avec. » Selon lui, cette crise a le bénéfice de rappeler aux chercheurs qu'ils doivent rester prudents dans leurs déductions.

DES PISTES DE SOLUTIONS

Pour avancer, toutefois, les scientifiques devront s'accorder sur des solutions – un défi aussi difficile que la pratique des statistiques elle-même. « La crainte est qu'en renonçant à cette pratique de longue date qui permettait de déclarer des résultats comme statistiquement significatifs ou non, on introduise une forme d'anarchie dans le processus », dépeint Ronald Wasserstein. Pourtant, les suggestions ne manquent pas. Elles incluent des changements dans les méthodes statistiques, dans le langage utilisé pour décrire ces méthodes et dans la façon dont les analyses statistiques sont utilisées. Les idées les plus marquantes ont été mises en avant dans une série d'articles publiés à la suite de la déclaration de l'Association américaine de statistique en 2016, où plus d'une vingtaine de statisticiens s'étaient mis d'accord sur plusieurs principes de réforme.

Ainsi, en 2018, 72 scientifiques ont publié un commentaire intitulé « Redéfinir la significativité statistique » dans la revue *Nature Human Behaviour*, où ils recommandaient d'abaisser le seuil de p de 0,05 à 0,005 pour qualifier un résultat de « découverte ». Des résultats entre 0,05 et 0,005 seraient juste considérés comme « indicatifs ». Daniel Benjamin, le premier auteur de cet article, voit dans cette mesure une solution imparfaite, à court terme, mais exploitable immédiatement.

Pour d'autres, en revanche, redéfinir la pertinence statistique ne sert à rien, car le vrai problème est l'existence même d'un seuil. Dans un article publié en 2019 dans la revue *Nature*, Sander Greenland et deux autres chercheurs – Valentin Amrhein, zoologiste à l'université de Bâle, en Suisse, et Blakeley McShane, statisticien et expert en marketing à l'université Northwestern, aux États-Unis – prônent ainsi l'abandon pur et simple du concept de significativité statistique. Pour eux, la valeur p doit être employée comme variable continue ➤

La probabilité que leurs résultats se réalisent si le boson n'existait pas était d'une chance sur 3,5 millions

blement déplacé. « Quand vous découvrez un variant génétique lié à une maladie ou à un autre phénotype, le standard de significativité statistique est 5×10^{-8} , ce qui équivaut à 0,05 divisé par 1 million, décrit Daniel Benjamin, qui mène aussi des recherches en génétique. La nouvelle génération d'études génétiques est réputée comme très robuste. »

Hélas, on ne peut pas en dire autant de la recherche biomédicale, où le risque de faux négatifs (le fait de rapporter qu'un effet n'est pas significatif alors qu'il est par ailleurs bien réel) est élevé. L'absence de preuve n'est pas la preuve de l'absence. De telles méprises

> (c'est-à-dire non restreinte à un seuil) parmi d'autres éléments de preuve. Par ailleurs, ils plaident pour renommer les intervalles de confiance «intervalles de compatibilité» – un terme qui refléterait mieux leur sens: la compatibilité avec les données, et non la confiance dans le résultat. Après un appel lancé à la communauté scientifique sur Twitter, les chercheurs ont reçu le soutien de 800 collègues, dont Daniel Benjamin.

Par ailleurs, des méthodes statistiques meilleures ou au moins plus simples existent. Andrew Gelman lui-même n'emploie pas le test de l'hypothèse nulle. Il préfère la méthodologie bayésienne, une approche statistique plus directe dans laquelle on part de présupposés sur l'issue de l'expérience, on ajoute les nouveaux résultats et on met à jour les présupposés. Sander Greenland, lui, encourage l'utilisation de la «surprise», une quantité mathématique qui ajuste la valeur-*p* pour produire des bits (similaires aux bits des ordinateurs) d'information.

Dans cette approche, une valeur-*p* de 0,05 ne représente que 4,3 bits d'information par rapport à l'hypothèse nulle. «Si on lance une pièce de monnaie, cela revient à obtenir 4 faces d'affilée, explique Sander Greenland. Est-ce une preuve suffisante pour démontrer que la pièce est éventuellement truquée? Non. Cette combinaison se produit souvent. C'est pourquoi 0,05 est une norme si faible.» Selon lui, si les chercheurs accompagnaient chaque valeur-*p* de sa traduction en bits, ils s'astreindraient à des standards plus élevés. Tenir plus compte de l'importance de l'effet aiderait également.

Enfin, améliorer l'éducation aux statistiques à la fois des chercheurs et du public rendrait davantage accessible le jargon des lois du hasard. Au début du xx^e siècle, quand Fisher a adopté le concept de significativité, ce mot avait une connotation moins forte qu'aujourd'hui. «Il relevait plus de la signification que de l'importance», rappelle Sander Greenland.

VIVRE AVEC L'INCERTITUDE

L'heure semble être venue de vivre dans l'inconfort de l'incertitude. Si l'on relève ce défi, la littérature scientifique changera de visage. Rapporter une découverte importante devrait «nécessiter un paragraphe, pas une phrase», déclare Ronald Wasserstein. Et ne pas se fonder sur une seule étude.

Les lignes commencent à bouger. «Nous sommes d'accord sur le fait que la valeur-*p* est parfois galvaudée ou mal interprétée, déclare Jennifer Zeis, porte-parole du *New England Journal of Medicine*. Conclure à l'efficacité d'un traitement si $p < 0,05$ et à son inutilité si $p > 0,05$ est une vision étroite de la médecine et ne reflète pas toujours la réalité.» Jennifer

Améliorer l'éducation aux statistiques rendrait davantage accessible le jargon des lois du hasard

Zeis affirme que les travaux publiés dans son journal recourent moins aux valeurs-*p*, voire s'appuient sur des intervalles de confiance sans valeurs-*p*. Sa revue a aussi adopté les principes de la science ouverte – des règles de bonne conduite qui obligent les auteurs à détailler davantage leurs protocoles de recherche et à respecter certains canons d'analyse, tout écart devant être dûment signalé.

De son côté, l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux n'impose aucune modification aux essais cliniques, d'après John Scott, qui dirige sa division de biostatistiques. «Il est très improbable que la valeur-*p* disparaisse dans un futur proche du développement des médicaments, mais à long terme les approches alternatives se multiplieront», prédit-il. L'inférence bayésienne, en particulier, suscite un intérêt grandissant.

Blair Johnson, qui vient d'être nommé rédacteur en chef du *Psychological Bulletin*, y promet des changements: «J'ai l'intention d'imposer des règles strictes sur la façon de rapporter une découverte. Afin que les lecteurs sachent ce qui s'est passé et pourquoi. Ils jugeront ainsi plus facilement si les méthodes sont fiables ou présentent des failles.» Il souligne aussi l'importance des métaanalyses et des articles de revue (qui dressent un bilan des découvertes dans un domaine) comme moyens de limiter les répercussions des études uniques.

La valeur-*p* «ne devrait être la clé d'aucune découverte», selon Blakeley McShane, qui prône une approche plus holistique et nuancée, davantage fondée sur l'évaluation. Une position que même les contemporains de Ronald Fisher auraient soutenue. En 1928, deux autres géants des statistiques, Jerzy Neyman et Egon Pearson, écrivaient à propos de l'analyse statistique: «Les tests eux-mêmes ne livrent aucun verdict, mais sont des outils d'aide à la décision.» ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Masquettiaux, **Le grand ménage de la psychologie**, *Pour la Science*, n° 504, pp. 46-51, 2019.

R. L. Wasserstein et al., **Moving to a world beyond " $p < 0.05$ "**, *American Statistician*, vol. 73, Suppl. 1, pp 1-19, 2019.

C. F. Camerer et al., **Evaluating the replicability of social science experiments in Nature and Science between 2010 and 2015**, *Nat. Hum. Behav.*, vol. 2, pp. 637-644, 2018.

Résilience ET DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE

DOSSIER RÉALISÉ EN PARTENARIAT AVEC ENGIE



DIDIER HOLLEAUX,
Directeur Général
Adjoint d'ENGIE

Pendant des années notre système énergétique a su tirer sa force de la combinaison des vecteurs énergétiques et notamment de l'électricité et du gaz. Pourquoi au moment où se développe la vision d'une transition énergétique fondée sur la complémentarité des énergies progressivement décarbonées et décentralisées, devrions-nous opposer l'électricité et le gaz ?

En dehors de l'énergie contenue dans les liaisons moléculaires, les principes de la physique et de la chimie n'ont à ce stade pas identifié d'autres moyens de stocker l'énergie qui soient à la fois denses énergétiquement et aisément mobilisables et transportables. C'est pourquoi les produits pétroliers ont eu un tel succès au cours du siècle dernier. Mais, condamnés notamment par leur empreinte carbone, ils sont amenés à être progressivement remplacés par le gaz (naturel puis vert). L'essor des énergies renouvelables et intermittentes pour la production d'électricité verte accentue le besoin de développer des solutions de production, de stockage et de transport, flexibles et fiables pour répondre aux demandes du réseau électrique.

Si la neutralité carbone à l'horizon 2050 pousse naturellement à une plus forte électrification des usages et si la maîtrise de la demande (efficacité énergétique et pilotage dans le temps) a assurément un rôle à jouer, elles ne doivent pas écarter les différents vecteurs décarbonés (hydrogène, biogaz...) tout aussi indispensables à un mix énergétique à la fois décarboné et économique. Pour répondre aux différents besoins de transition vers le « zéro carbone » de nos clients (citoyens, industries et collectivités locales) ces solutions performantes sont également primordiales.

Le présent cahier a pour ambition de montrer toute la diversité des solutions qui vont rendre effective la réduction des émissions de gaz à effet de serre et rendre réaliste l'objectif de la neutralité carbone en tirant le meilleur parti de toutes les ressources et vecteurs disponibles. Comme la biodiversité, la diversité énergétique rend notre monde plus résilient : elle doit être préservée. ■



La recherche, un accélérateur nécessaire vers la neutralité carbone

Selon la définition classique forgée au début de l'ère industrielle, l'énergie est la capacité d'un système à produire un travail. Aujourd'hui, dans nos sociétés modernes, cette définition semble bien limitée par rapport à ce que l'énergie offre réellement. Dans une perspective plus large et actualisée, nous pourrions la redéfinir comme la capacité à produire des biens à haute valeur ajoutée. De fait, grâce à l'énergie nous bénéficions de l'éclairage, de chaleur, d'eau propre, de nourriture abondante, de mobilité, d'information... En somme d'une simple pression sur un interrupteur ou d'une ouverture de vanne, nous profitons de tout le confort nécessaire, et bien plus encore, dans nos maisons et nos usines. Nous lui devons nos récoltes, leur conservation par le froid, leur transport, mais aussi l'éducation, la santé et la sécurité. Notre civilisation

repose sur l'accès à l'énergie. Le corollaire est qu'en son absence, tout s'effondre.

Absence ne signifie pas disparition, car, les lois de la thermodynamique sont formelles, l'énergie se conserve. Nous ne pouvons pas en fabriquer plus, nous ne pouvons que la déplacer et surtout la transformer. Le cœur de notre relation avec l'énergie se situe à ce niveau : exploiter à notre avantage ces transformations et contenir leurs impacts environnementaux. Or étendre à tous les bénéfices de l'énergie sans réchauffer l'atmosphère, acidifier les océans ni éroder les terres exige de réfléchir au développement de nouvelles solutions.

LA COMPLEXITÉ DU MONDE

Dans notre monde moderne, nous avons chacun un rapport ambivalent avec l'énergie, entre exaltation et culpabilité : c'est un sérieux dilemme. Comment pouvons-nous retirer tous

SOMMAIRE

II LA RECHERCHE, UN ACCÉLÉRATEUR NÉCESSAIRE VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

Michael E. Webber

IV LES MOLÉCULES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Ronnie Belmans et Jan Mertens

VIII POUR UNE DÉCARBONATION OPTIMALE

Hugues de Peufeilhous, Gauthier de Maere d'Aertrycke
et Pierre-Laurent Lucille

X LA RÉVOLUTION ATTENDUE DES BATTERIES

Rafael Jahn, Dominique Corbisier et Paulo Torres

XII UN MARIAGE DE RAISON

Carole Le Henaff, Grégoire Hévin, Christian Huet et Delphine Patriarche

XIV UNE MOBILITÉ ÉLECTRIQUE RÉVÉE

Laurent De Vroey

XVI VERS DES CROISIÈRES PLUS PROPRES

Frédéric Legrand et Gabrielle Menard

XVIII POUR UNE INDUSTRIE ZÉRO CARBONE

Ludovic Ferrand, Philippe Buchet et Jean-Pierre Keustermans

XX L'AVENIR DES POMPES À CHALEUR

Akim Rida et Jean-Yves Druillenec

XXII CHAUFFER SANS RÉCHAUFFER... LE CLIMAT !

Benjamin Haas et Mures Zarea

XXIV UN MONDE DÉCARBONÉ... ET CLIMATISÉ

Rodolphe Desbois et Cristian Muresan

XXVI VERS UNE AGRICULTURE NEUTRE EN ÉMISSIONS

Elodie Le Cadre Loret et Bérengère Genouville

XXVIII POUSSER À L'OMBRE DU SOLAIRE

Jöran Beekkerk Van Ruth, Stijn Scheerlink, Rob Kursten et
Claire Du Colombier

XXX TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, L'INDISPENSABLE COMPLÉMENTARITÉ

Adeline Duterque, Luc Goossens et Jan Mertens

les bienfaits de l'énergie sans les inconvénients associés de la pollution, de la volatilité des prix et des risques pour la sécurité nationale ?

La réponse est de reconnaître que chaque carburant ou technologie a ses avantages et ses inconvénients. La consommation d'énergie dans le monde est un système complexe qui comporte un grand nombre d'éléments. Le secteur de l'énergie est étroitement connecté à la société par de nombreux liens, évidents ou non.

S'il est une leçon que nous devons garder à l'esprit pour relever les défis associés à l'énergie, c'est qu'il n'existe pas de solutions universelles et immédiates. Nous avons besoin d'un ensemble de solutions adaptées à chaque territoire, car aucune option unique ne peut nous conduire vers un avenir décarboné sans un inconvénient majeur : un coût très élevé, un déploiement à une échelle insuffisante ou une faible fiabilité.

Cela signifie que nous avons besoin d'architectes énergétiques innovants pour développer davantage d'options, réduire le coût de celles existantes et optimiser la façon dont elles s'articulent. L'un des enjeux d'avenir pour les pouvoirs publics sera de soutenir financièrement le monde de la recherche, dans le domaine de l'énergie, pratiquée en laboratoires industriels, nationaux et universitaires à travers le monde afin d'accélérer le rythme de l'innovation. Et parce que le défi est complexe et trop important pour qu'une entreprise ou un gouvernement puisse le relever seul, nous devons collaborer par-delà les secteurs, les disciplines universitaires et les frontières.

La solution passe par l'abandon des vieux clichés qui opposent les combustibles fossiles aux énergies renouvelables, l'électricité au gaz et bien d'autres conflits stériles. Nous avons besoin d'une vision plus précise. Les anciennes stratégies qui nous ont conduits là où nous en sommes – forer plus, construire plus de routes, consommer plus – ne nous seront d'aucun secours. Une ferveur technologique dépassée en des gadgets plus « intelligents » ne sera pas d'une plus grande utilité. L'efficacité énergétique est une manière de réduire notre empreinte carbone sans réduire notre qualité de vie mais ce n'est pas assez.

Le moyen le plus rapide, le moins cher et le plus fiable d'atteindre la neutralité carbone des énergies repose sur un mix d'électricité et de combustibles à faible teneur en carbone. Nous avons besoin, d'une part, de nouvelles formes d'énergie plus propres et, d'autre part, d'une réduction des émissions des formes d'énergie conventionnelles avec, par exemple, la capture et le stockage du carbone, afin de maintenir et même d'élargir l'accès à l'énergie sans « brûler notre maison ».

Les domaines sur lesquels nous pouvons agir rapidement sont nombreux. Citons la production d'électricité à faible teneur en carbone issue de l'éolien, du solaire et de la géothermie, les gaz à faible teneur en carbone comme le biométhane, le méthane synthétique, l'hydrogène et les

vecteurs d'hydrogène (l'ammoniac, l'acide formique et le méthanol). D'autres leviers importants résident dans les technologies diminuant les quantités de CO₂ dans l'atmosphère par le biais du piégeage du carbone, le captage direct de l'air et la séquestration du carbone dans le sol, ainsi que dans les outils transversaux, notamment les drones, les robots, les capteurs et l'intelligence artificielle. On peut enfin compter sur les utilisations intelligentes et efficaces de l'énergie s'appuyant sur le stockage de l'énergie, les appareils intelligents et l'éducation des utilisateurs pour modifier les comportements et les habitudes.

Chez ENGIE, les programmes de recherche portés par nos équipes de chercheurs sont organisés autour de ces thèmes, et notre analyse des travaux des principaux laboratoires nationaux et des plus grandes entreprises internationales du secteur révèle que nous ne sommes pas les seuls à envisager l'avenir de cette façon. De fait, nous sommes tous confrontés aux mêmes problématiques. Peut-être pourrions-nous agir collectivement et donc plus rapidement ?

L'adoption d'un ensemble de solutions plus propres tout en améliorant l'accès à l'énergie et en fermant nos actifs les plus polluants est le chemin que nous devons emprunter vers l'avenir. Le changement est une chose souhaitable, et nous devons nous y atteler, mais sa mise en place est lente. Il est largement temps de nous y mettre. C'est ici que le besoin de recherche est le plus prégnant : accélérer la transition.

LE TEMPS PRESSE

Des décennies, voire des siècles, sont le plus souvent nécessaires pour passer d'un combustible ou d'une technologie dominante à un autre. Aux États-Unis, le charbon est devenu la source d'énergie la plus populaire en 1885 et n'a été dépassé par le pétrole que soixante-cinq ans plus tard, en 1950. Le pétrole est toujours en tête aujourd'hui, mais pourrait bien être dépassé par le gaz naturel dans la prochaine décennie, ce qui mettrait fin à quatre-vingts ans de règne.

Si le gaz naturel présente des avantages notables en termes d'environnement et de performance, nous n'aurons pas quatre-vingts ans pour le remplacer par des options plus propres, comme l'électricité sans carbone ou d'autres gaz à faible empreinte environnementale. La course est lancée, à vive allure, et notre tâche, dans le monde de la recherche, est d'atteindre la dimension industrielle de ces alternatives et d'en diminuer les coûts afin qu'elles puissent être adoptées à grande échelle le plus rapidement possible.

Maintenant la mission de nos équipes est d'accélérer le rythme afin de relever les défis énergétiques aux côtés de nos partenaires scientifiques et académiques et de contribuer à développer les solutions énergétiques d'avenir qui permettront de préserver la biodiversité, le climat et l'inclusion sociale. ■

Les molécules de la transition énergétique

Quel que soit le chemin emprunté vers un monde zéro carbone, l'offre énergétique ne pourra pas compter que sur l'électricité : des molécules comme l'hydrogène, le méthane, l'éthanol... resteront longtemps indispensables.

LES AUTEURS

RONNIE BELMANS, PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN, EN BELGIQUE, DIRECTEUR GÉNÉRAL D'ENERGYVILLE, ET JAN MERTENS, PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE GAND, EN BELGIQUE, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE D'ENGIE

LES AUTEURS REMERCIENT LE CONSEIL SCIENTIFIQUE D'ENGIE POUR LES DISCUSSIONS RICHES ET PERTINENTES SUR LE SUJET.

Pendant longtemps, la décarbonation de l'électricité a été perçue comme un élément clé de la transition énergétique, notamment *via* l'essor massif des énergies renouvelables produisant de l'électricité. Malgré leur intermittence, le développement des technologies de l'information et celles de la gestion des données devraient assurer un fonctionnement stable et fiable de l'ensemble. La demande variant, l'offre devra également s'adapter notamment grâce à des batteries stockant le surplus ponctuel d'énergie. Mais au final, le client pourra compter sur l'électricité pour bénéficier des meilleurs services énergétiques. Ce modèle « électrique », même s'il sera à coup sûr au cœur du futur système énergétique, n'en suscite pas moins des questions et des préoccupations.

LA PART DE L'ÉLECTRICITÉ

D'abord, il convient de bien distinguer le système énergétique dans son ensemble de la seule production électrique, qui n'en représente qu'une petite part. En Belgique, par exemple, en 2016, 81,4 térawattheures d'électricité ont été fournis (pour une production de 85,4). Notons qu'avec l'augmentation de la production décentralisée, c'est-à-dire à l'échelle locale, comme la cogénération (la

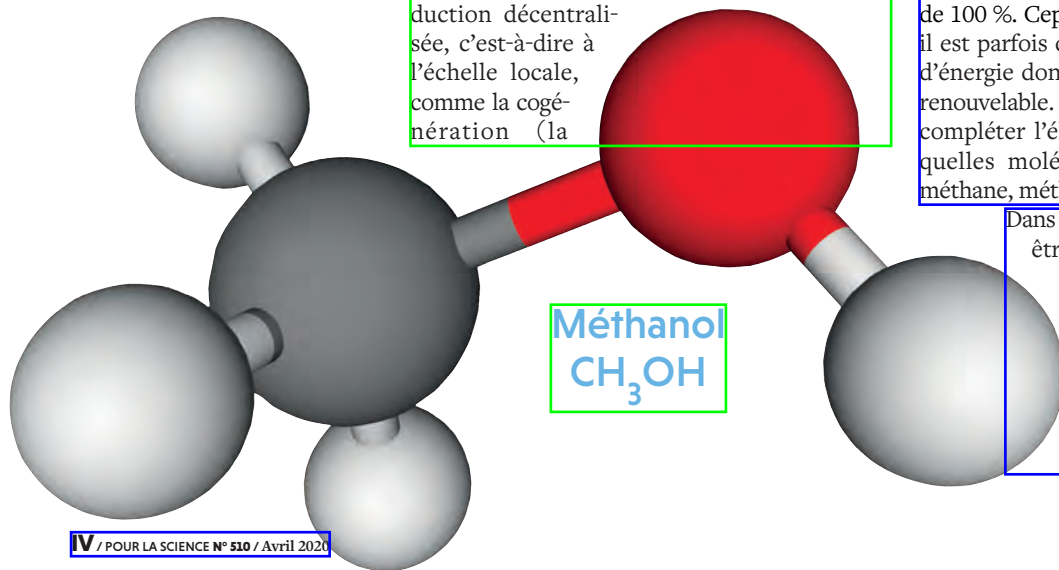
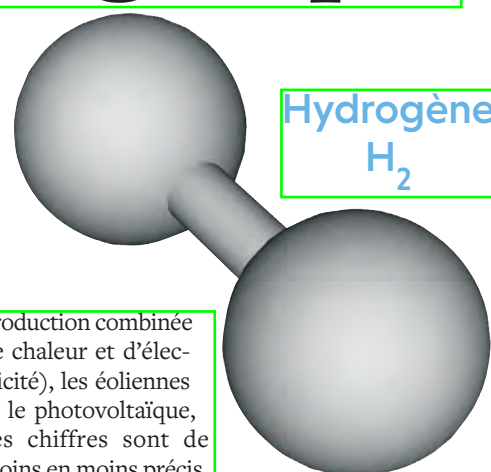
production combinée de chaleur et d'électricité), les éoliennes et le photovoltaïque, ces chiffres sont de moins en moins précis.

Quant à la consommation

tion finale d'énergie globale (électricité, gaz, pétrole, charbon, biomasse, déchets), elle fut de 489 térawattheures. Plus encore, la consommation d'énergie primaire, qui mesure la demande totale en énergie d'un pays, était de 657 térawattheures. L'écart s'explique par l'énergie consommée par l'industrie chimique, la sidérurgie, la filière nucléaire... En revanche, le transport maritime et l'aviation internationale ne sont pas pris en compte. En fin de compte, on estime que l'électricité représente 16,6 % de la consommation finale d'énergie en Belgique. À l'échelle du continent européen, ce chiffre atteint 17,9 % (3 255 térawattheures d'électricité contre 18 154 d'énergie primaire).

Les lois de la thermodynamique indiquent que l'utilisation directe de l'énergie électrique est toujours à privilégier, car la transformer, par exemple en énergie chimique ou calorifique, diminue sa capacité à fournir du travail : en termes physiques, on dit que son indice exergétique est de 100 %. Cependant, selon les services requis, il est parfois difficile de remplacer une source d'énergie donnée par une électricité d'origine renouvelable. C'est là que les molécules peuvent compléter l'électron, voire s'y substituer. De quelles molécules parle-t-on ? Hydrogène, méthane, méthanol, éthane, éthanol...

Dans tous les cas, ces molécules devront être produites à partir d'électricité décarbonée, ou de biogaz neutre en carbone, faute de quoi la transition vers un monde sans carbone échouera. Une alternative, ou plutôt une solution intermédiaire, serait la capture et le stockage du CO₂, voire sa



réutilisation. Autrement, seules deux sources de molécules sont neutres en carbone : celles produites à partir d'eau et de CO_2 à l'aide d'une énergie verte et celles, que nous n'aborderons pas ici, issues de la biomasse.

Dans les industries intensives, hautement énergivores, ce besoin en molécules est particulièrement évident, comme vecteur énergétique, mais surtout comme matière première. La synthèse d'une molécule de méthane (CH_4) ou de méthanol (CH_3OH) à partir de CO_2 et de H_2O requiert beaucoup plus d'énergie que celle, réutilisable ensuite, contenue dans la molécule elle-même. Par conséquent, ce besoin en molécules augmentera fortement la demande en énergie totale. Certains secteurs de l'industrie réclamant des molécules pour des applications spécifiques, par exemple pour la chimie spécialisée, seront à étudier au cas par cas.

Un bon exemple de l'utilité des molécules dans la réussite de la transition énergétique est la « Dunkelflaute », un terme allemand signifiant une longue période sans soleil et sans vent pendant laquelle la production d'énergie est impossible. Avec l'hydrogène, des molécules « propres » à un (méthane et méthanol) ou deux atomes de carbone (éthane C_2H_6 et éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) aideront à suppléer au manque d'énergie solaire et éolienne. Il s'agira alors de choisir la mieux adaptée.

TRANSPORT ET MOLÉCULES

Les vertus de ces molécules sont souvent évidentes lorsqu'on se penche sur le secteur des transports, même si l'on doit se garder de généraliser à tous les modes. De fait, les deux roues, des vélos électriques de plus en plus plébiscités jusqu'aux motos électriques dont le marché progresse, n'ont pas besoin de molécules. Et il en va de même pour les voitures électriques des particuliers. Pour ces véhicules, la batterie est en termes de coût plus avantageuse qu'une solution à base d'hydrogène. De fait, ils profitent de l'infrastructure existante (on peut recharger facilement) et ils jouissent d'une bien meilleure efficacité énergétique, comparé par exemple aux piles à combustible qui pourraient équiper certains véhicules électriques. La prochaine décennie sera déterminante pour le développement des voitures particulières fonctionnant à l'hydrogène.

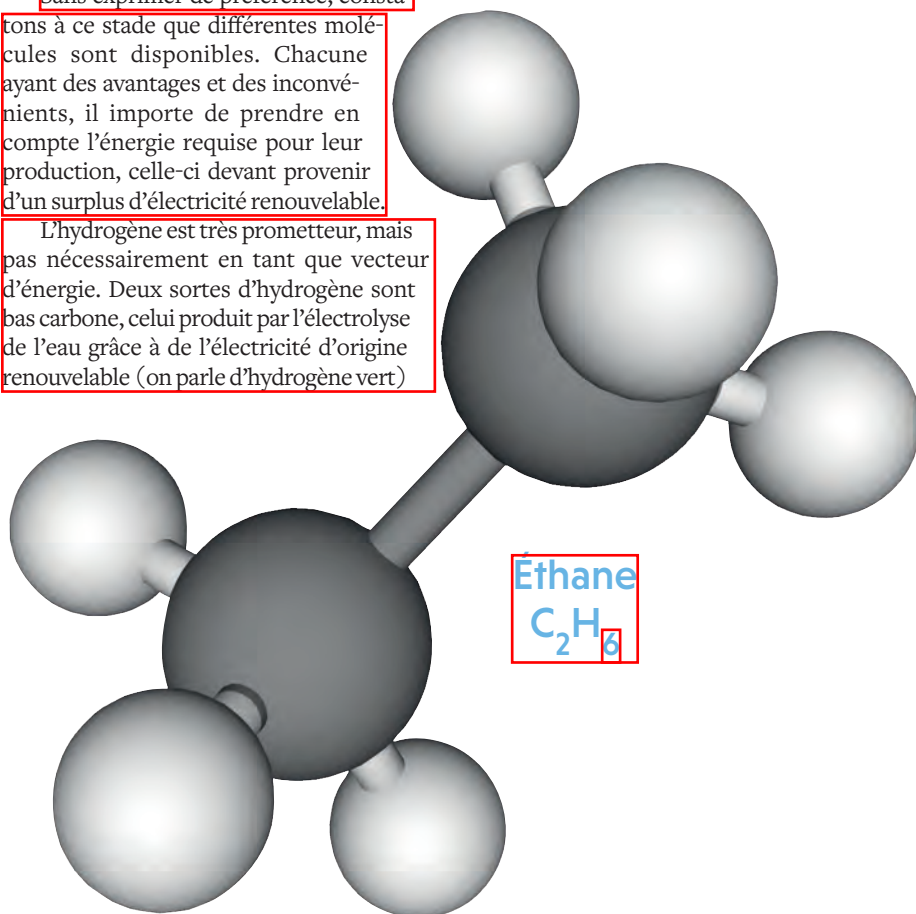
Le futur du transport de marchandises sur route est encore flou. Certes, des camions électriques équipés de batteries roulent déjà. Et Siemens expérimente de son côté une autre approche : équiper une voie d'autoroute de caténaires pour que les camions hybrides puissent rouler grâce à l'énergie électrique tout en chargeant leurs batteries, indispensables pour les premiers et les derniers kilomètres. Le besoin en molécules sera là encore faible, voire nul.

“ Les vertus des molécules sont souvent évidentes lorsqu'on se penche sur le secteur des transports ”

Les trains, les bus et les transports locaux seront de plus en plus électrifiés. Le transport fluvial devrait lui aussi adopter la propulsion électrique au moins pour une partie de son activité. Mais on ignore encore si les batteries auront une densité énergétique assez élevée pour parcourir de longues distances, sans prendre trop de place à bord ni augmenter le poids de façon significative. Les molécules auront certainement un rôle à jouer dans ce domaine, d'autant plus pour la navigation maritime, où les besoins en énergie sont nettement plus importants. Le constat est le même pour l'aviation, bien que les premiers avions électriques aient déjà effectué de courtes distances. Quant aux drones, qui occuperont une place importante dans la mobilité du futur (services de livraison, taxi dans les grandes villes...), ils sont déjà électriques.

Sans exprimer de préférence, constatons à ce stade que différentes molécules sont disponibles. Chacune ayant des avantages et des inconvénients, il importe de prendre en compte l'énergie requise pour leur production, celle-ci devant provenir d'un surplus d'électricité renouvelable.

L'hydrogène est très prometteur, mais pas nécessairement en tant que vecteur d'énergie. Deux sortes d'hydrogène sont bas carbone, celui produit par l'électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité d'origine renouvelable (on parle d'hydrogène vert)



et l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles, mais dont le CO_2 est capturé (hydrogène bleu). Cet hydrogène bas-carbone, ainsi que les combustibles de synthèse, seront essentiels à la décarbonation de vastes secteurs de l'économie mondiale et donc une aide précieuse dans nos efforts visant à limiter le réchauffement de la planète à moins de 2°C . Citons notamment l'industrie chimique, la pétrochimie, l'acier, le ciment et l'industrie papetière.

De nombreuses études vantent la production d'énergie électrique dans les déserts, des régions non seulement étendues, mais aussi très ensoleillées. La littérature indique que le Sahara et l'Australie sont des zones potentielles. Mais comment transporter l'énergie, par exemple, du Sahara vers l'Europe ? Deux possibilités : les lignes à courant continu haute tension (CCHT), ou sous forme d'énergie chimique, c'est-à-dire de molécules. De nombreux spécialistes évoquent l'hydrogène, mais deux questions se posent. Cette molécule est-elle la mieux adaptée du point de vue énergétique ? Est-elle la plus performante ? Il est évident que l'électricité n'est pas une option en Australie, compte tenu de la distance avec l'Europe.

L'AVANTAGE DU MÉTHANE

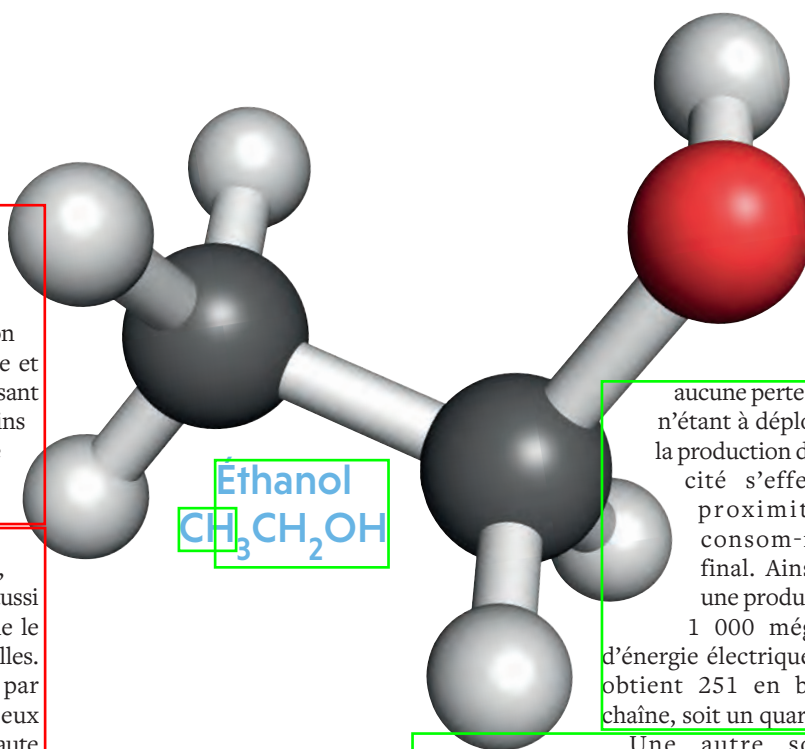
Détaillons la chaîne énergétique de l'hydrogène. D'abord un électrolyseur est requis, ce dispositif produisant de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau en décomposant des molécules d'eau (H_2O) en H_2 et O . Or trouver de l'eau dans le Sahara, ou dans tout autre environnement désertique, n'est pas sans poser des difficultés, mais passons.

Partons sur une efficacité de 70 %

pour cette étape. Le moyen le plus efficace pour transporter l'hydrogène en Europe est le transport sous forme liquide par bateau dans des réservoirs cryogéniques. La température d'ébullition de l'hydrogène étant extrêmement basse ($-252,87^\circ\text{C}$), sa liquéfaction est très énergivore. Différentes valeurs de rendement existent dans la littérature, mais prenons là encore 70 % pour cette deuxième étape.

La consommation d'énergie liée au transport, y compris celui du gaz par pipeline jusqu'au site de liquéfaction situé sur la côte, est estimée à 10 % : le rendement de cette troisième étape est donc de 90 %. L'évaporation nécessite 5 % d'énergie supplémentaire. Le bilan global à ce stade est d'environ 40 %. L'hydrogène peut ensuite être injecté directement dans le réseau de distribution de gaz naturel et livré au consommateur final en tant que tel.

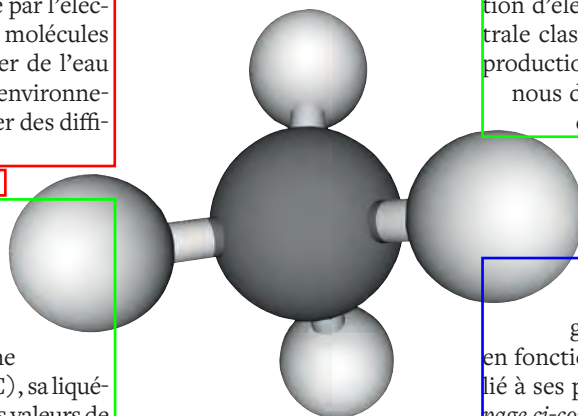
L'hydrogène peut être transformé en électricité sur le lieu de consommation par une pile à combustible (avec un rendement de 60 %),



Ethanol
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$

aucune perte en ligne n'étant à déplorer, car la production d'électricité s'effectue à proximité du consommateur final. Ainsi, pour une production de 1 000 mégawatts d'énergie électrique, on en obtient 251 en bout de chaîne, soit un quart.

Une autre solution consiste à convertir l'hydrogène en méthane à l'aide de CO_2 capté dans l'air ou transporté par des canalisations. L'efficacité du procédé est estimée à 60 %. La liquéfaction ainsi que le transport du méthane sont nettement plus efficaces que l'hydrogène, avec respectivement 95 % de rendement et environ 0,1 % de perte par jour (soit 3 % par voyage). En termes d'évaporation, nous pouvons compter sur un rendement de 99 %, ce qui conduit à une efficacité globale à cette étape de 54,7 %. En ce qui concerne la production d'électricité, on peut recourir à une centrale classique à haut rendement (65 %). La production d'électricité étant alors centralisée, nous devons prendre en compte les pertes en ligne (92 %), ce qui donne un rendement global de 32,7 %.



Méthane
 CH_4

LA BONNE MOLECULE POUR LE BON USAGE

Dans cet exemple, le méthane apparaît plus avantageux. Plus largement, le choix de la bonne molécule en fonction de son utilisation est étroitement lié à ses paramètres physiques (voir le tableau page ci-contre).

L'élément de comparaison pertinent est la densité d'énergie par unité de masse ou de volume. Plus la valeur est élevée, plus le vecteur énergétique est utile, transportable, facile à stocker et, dans ce cas, adapté aux applications mobiles.

Dans des conditions normales, la densité énergétique volumique de l'hydrogène est extrêmement faible, ce qui pose des problèmes de stockage et de transport. Nous pouvons atténuer quelque peu ces contraintes en augmentant la pression, mais la densité énergétique restera au mieux six fois inférieure à celle de l'essence. Cela constituera toujours un inconvénient majeur pour le secteur des transports.

À CHAQUE ÉNERGIE SES PROPRIÉTÉS

Offre énergétique	Energie spécifique MJ/kg	Densité d'énergie MJ/l	Masse volumique kg/m ³
Fioul domestique	46,2	37,3	807,359
Gaz naturel	53,6	0,0364	0,679
Méthane	19,7	15,6	791,878
Méthane (1,013 bar, 15 °C)	55,6	0,0378	0,680
Propane (gaz de pétrole liquéfié : GPL)	49,6	25,3	510,081
Butane (GPL)	49,1	27,7	564,155
Gaz naturel liquéfié (GNL) à -160 °C	53,6	22,2	414,179
Ammoniaque liquide (sa combustion donne de l'azote N ₂ et de l'eau H ₂ O)	18,6	11,5	618,280
Kérosène	43	35	813,953
Hydrogène liquide à pouvoir calorifique supérieur (PCS), c'est-à-dire incluant l'énergie de la vapeur d'eau dégagée	141,86	10,044	70,802
Hydrogène liquide à pouvoir calorifique inférieur (PCI)	119,93	8,491	70,800
Hydrogène PCS (1 atm à 15,5 °C)	141,86	0,01188	0,084
Hydrogène PCI (1 atm à 15,5 °C)	119,93	0,01005	0,084
Hydrogène PCI (690 atm à 15,5 °C)	141,86	5,323	37,523
Hydrogène PCI (690 atm à 15,5 °C)	119,93	4,5	37,522
Essence	46,4	34,2	737,069
Éthanol	30	24	800,000
Gasoil	45,6	38,6	846,491
Pétrole brut	41,868	37	883,730
Gaz naturel comprimé (GNC) à 250 bars	53,6	9	167,910
Biodiésel	42,2	33	781,991

En comparaison, la densité d'énergie du méthane liquide (GNL) est plus de deux fois supérieure à celle de l'hydrogène liquide. À volume transporté égal, le méthane liquide véhicule deux fois plus d'énergie. De plus, nous l'avons vu, la faible température d'ébullition de l'hydrogène entraîne d'importantes contraintes en termes d'équipements nécessaires (réservoirs, pompes et compresseurs).

VERT OU BLEU ?

Ainsi, on peut en conclure que dans une société sans carbone, les besoins en hydrogène d'origine renouvelable seront massifs. Cette molécule représentera une étape intermédiaire critique dans la fourniture d'énergie spécifique la mieux adaptée à chaque besoin et une matière première essentielle pour l'industrie.

Le choix entre l'hydrogène vert et son pendant bleu dépendra évidemment du coût et, plus spécifiquement pour l'hydrogène vert,

RÉFÉRENCES

E. Hegnsholt et al., **The real promise of hydrogen**, Boston Consulting Group, 31 juillet 2019.
<http://bit.ly/BCG-Hydro>

A. Scipioni et al. (éd), **Hydrogen economy**, Academic Press, 2017.

M. Larsson et al., **Synthetic fuels from electricity for the Swedish transport sector : comparison of well to wheel energy efficiency and costs**, *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1875-1880, 2015.

J. Van Mierlo et al., **Which energy source for road transport in the future ? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles**, *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, pp. 2748-2760, 2006.

U. Vol Bossel, **Does a hydrogen economy make sense**, *proceedings of the IEEE*, vol. 94(10), pp. 1826-1837, 2006.

de la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables nécessaires à sa production. En ce qui concerne l'hydrogène bleu, la question de l'opinion publique et son acceptation du stockage du CO₂ se posera.

L'option consistant à capturer et stocker le CO₂ est la mieux adaptée aux grandes installations, par exemple dans l'industrie chimique ou sidérurgique. Elles sont d'ores et déjà dotées de canalisations et de dispositifs de stockage. La route vers l'hydrogène vert est plus fragmentée et convient davantage, du moins au début, à des investissements moins importants. Quelle que soit la solution retenue, il reste beaucoup de chemin à parcourir, même si certains éléments, comme les électrolyseurs, sont déjà parvenus à maturité.

Toujours est-il que les molécules, d'hydrogène ou à base de carbone, resteront longtemps indispensables pour faire de la transition énergétique une réalité. ■

Pour une décarbonation optimale

Comment l'Europe peut-elle atteindre la neutralité carbone en 2050 au meilleur coût ? Et quelles technologies mettre en œuvre pour répondre efficacement aux ambitions du *Green Deal* ?

LES AUTEURS

HUGUES DE PEUFEILHOUX,
GAUTHIER DE MAERE
D'AERTRYCKE ET
PIERRE-LAURENT LUCILLE,
ENGIE

En décembre 2019, Ursula von der Leyen, la présidente de la Commission européenne, a officiellement lancé le pacte vert pour l'Europe (*European green deal*) dont l'ambition est de faire de l'Europe le premier continent neutre en carbone d'ici 2050. Dans quelle mesure est-ce un objectif atteignable ?

L'étude d'ENGIE « Decarbonizing Central Western Europe » menée en 2019 dans les principaux marchés énergétiques interconnectés de l'Europe de l'Ouest (*voir ci-contre*) apporte des éléments de réponse. Il s'agit de l'analyse économique de la réorganisation de la production d'énergie vers des sources « propres » pour progressivement éliminer toute émission de CO₂. Plus précisément, l'idée est de tester la faisabilité de la décarbonation en Europe de l'Ouest des secteurs électrique, chaleur et transport d'ici à 2050 et d'identifier un chemin économiquement optimal qui s'appuie sur les atouts de chacun des vecteurs énergétiques.

Outre l'électricité, terrain familier des modélisateurs, les autres usages énergétiques que sont la production de chaleur (industrielle et résidentielle), le transport et l'agriculture ont été simulés, afin de combiner les différents effets de substitution inhérents à la transition énergétique. Il s'agit de trouver un nouvel équilibre d'ensemble optimisé entre électricité, biogaz, hydrogène et biomasse pour répondre au mieux aux usages.



Les pays de l'étude « Decarbonizing Central Western Europe ».

Pour des raisons

d'acceptabilité et de disponibilité en sites, le développement de la séquestration du CO₂ n'a pas été pris en compte. Mais toutes les autres technologies énergétiques, y compris les systèmes de stockage et ceux favorisant la flexibilité, comme l'utilisation du stock de véhicules électriques en symbiose avec le réseau, concourent à répondre à l'atteinte d'un système décarboné. Celle-ci réclame néanmoins un effort ambitieux en termes d'efficacité énergétique, qui conduirait à une réduction de la demande finale en énergie de près de 41 % d'ici 2050.

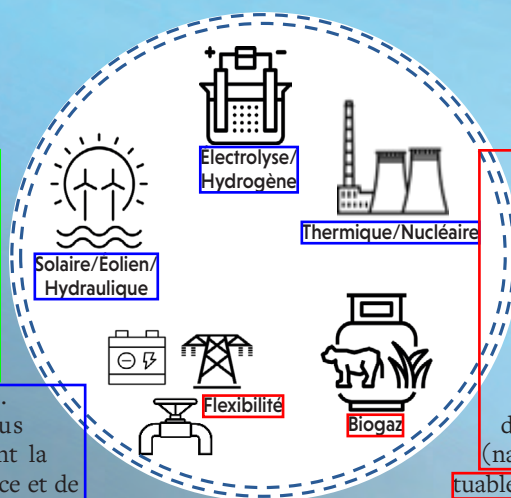
Par rapport à la plupart des études disponibles qui simulent des chiffres annuels, voire uniquement l'image finale en 2050, ou bien ne se focalisent que sur un sous-secteur, l'optimisation combinée de tous les usages énergétiques, à un

pas horaire, est un progrès décisif. Grâce à cette étude, on a désormais accès à l'impact réel des contraintes techniques et économiques, comme la saisonnalité de la consommation et de la production, les pics de consommation, ainsi qu'à l'interdépendance économique des sources de production.

Cinq scénarios ont été modélisés. Intéressons-nous aux deux plus représentatifs de ceux qui réussissent la transition : ceux d'électrification précoce et de transition multivecteurs équilibrée. Dans le premier, l'Europe substitue son mix actuel essentiellement par de l'électricité verte, en comptant uniquement sur ses ressources domestiques pour des questions d'indépendance. L'Europe électrifie tôt et fortement l'ensemble des usages finaux pour atteindre la décarbonation complète. Ce scénario requiert une électrification intense, supérieure à 60 % des besoins énergétiques contre 25 % aujourd'hui.

Dans le second scénario, l'Europe promeut le développement de l'électricité verte et celui des gaz verts (biométhane, hydrogène vert...). Le continent peut cette fois importer du gaz vert de certains partenaires commerciaux. Les importations concerneraient en majeure partie du méthane de synthèse élaboré à partir d'électricité verte destiné aux pays du Nord. Mais même dans ce scénario ouvert aux importations, l'indépendance de la zone Europe étudiée serait bien supérieure (82 % à 2050 contre 17 % aujourd'hui).

Dans les deux scénarios, la flexibilité du système électrique est analysée, résultant de la mobilisation optimale de chacune des ressources, des batteries disponibles jusqu'aux centrales thermiques alimentées par des gaz verts. La tension maximale n'est plus comme aujourd'hui l'heure de plus forte demande absolue, mais la période où la différence entre cette demande et la contribution des ressources renouvelables intermittentes est la plus forte, ce qui correspond par exemple à plusieurs jours sans vent en hiver. Le scénario d'électrification précoce est plus sensible à ces effets et doit déployer davantage de ressources de flexibilité pour y faire face. Quels sont les principaux enseignements ?



Les contributeurs de la transition énergétique.

D'abord, et c'est rassurant, la neutralité carbone est possible selon plusieurs scénarios plus ou moins électrifiés. Dans tous les cas, la transition repose sur trois piliers : l'efficacité énergétique, le développement massif des énergies renouvelables électriques et une répartition optimisée des usages par vecteur. Ce dernier point conduit à l'utilisation du gaz (naturel, puis vert) là où il est peu substituable et plus compétitif.

DES COÛTS IDENTIFIÉS EN DÉTAIL

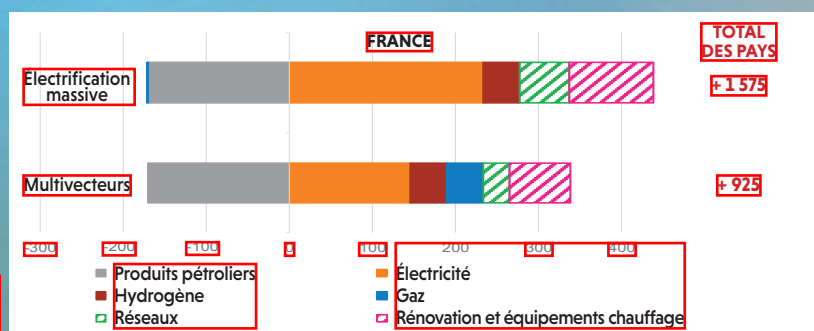
Autre enseignement, la décarbonation selon le scénario multivecteurs bénéficie de coûts plus optimisés (voir la figure ci-dessous) qu'avec l'électrification. L'écart s'élève à 650 milliards d'euros, les coûts étant calculés en valeur nette actualisée de l'ensemble du système énergétique. Comment expliquer ce surcoût ? Parce que le scénario multivecteurs n'impose ni de développer de nouvelles capacités de production flexibles ni de surdimensionner le réseau de transport et de distribution électriques pour compenser l'intermittence de l'électricité renouvelable.

L'étude montre également que les ressources européennes en biométhane sont pleinement valorisées dans tous les scénarios de décarbonation, associées à 500 térawattheures d'hydrogène vert, soit un peu plus que la consommation française actuelle en gaz naturel. Le complément est apporté soit par des importations de gaz verts dans le scénario multivecteurs, soit par une production supplémentaire d'hydrogène en Europe dans le scénario d'électrification.

La France dispose en Europe d'un avantage concurrentiel sur les ressources renouvelables – vent, soleil et biomasse – et devra toutes les solliciter. S'appuyer sur seulement deux des trois ressources conduirait à surdimensionner inutilement le système électrique européen, alors même que les besoins en développement annuel de capacités renouvelables s'élèvent déjà à 44 gigawatts (27 pour le solaire et 17 pour l'éolien) pendant trente ans, ce qui constitue un défi majeur tant en termes d'investissement que d'acceptabilité.

Au final, si l'électrification de certains usages est indispensable, le curseur ne doit sans doute pas être poussé trop loin au risque d'une transition énergétique excessivement brutale sur le plan technique sans aucun gain environnemental. Utiliser pleinement les différents vecteurs décarbonés (dont les gaz verts) permet une transition plus résiliente et moins chère lorsqu'on mesure les effets tout au long de la chaîne de valeur, et pas seulement à la production ou à la consommation d'énergie. Transmis à la Commission européenne ! ■

Selon le scénario, électrification massive ou multivecteurs, le surcoût (ici pour la France, en milliards d'euros, et en rouge pour l'ensemble des pays de l'étude) par rapport à une trajectoire inchangée dite « business as usual » diffère.



La station belge
Princesse Élisabeth,
en Antarctique.

La révolution attendue des batteries

L'essor des énergies renouvelables réclame un large déploiement de solutions de stockage de l'électricité. Les technologies actuelles sont performantes, mais encore insuffisantes. La recherche s'active pour y remédier.

Ancrée sur un éperon rocheux, la station Princesse Élisabeth trône en Antarctique. Cette base scientifique belge, inaugurée le 15 février 2009, a la particularité d'utiliser exclusivement les énergies renouvelables grâce à l'énergie solaire fournie par des panneaux photovoltaïques et des panneaux thermiques, complétée par neuf éoliennes. Cette prouesse a été rendue possible par les nombreuses batteries installées pour stocker l'électricité et en gérer les intermittences.

De fait, ces dispositifs seront incontournables pour réussir la transition énergétique vers le zéro carbone. Celle-ci requiert un essor important des sources renouvelables dont l'intermittence dépassera les limites de stabilité du système électrique actuel, au moins de façon locale. L'intermittence est une caractéristique plus complexe à gérer qu'on ne le pense. Aujourd'hui, le réseau électrique, les

LES AUTEURS

RAFAEL JAHN ET
DOMINIQUE CORBISIER,
ENGIE LABORELEC.
PAULO TORRES, ENGIE

productions classiques interconnectées et les réserves de production contractées par l'opérateur du réseau sont souvent suffisamment développés pour atténuer les intermittences rapides (de la seconde jusqu'au quart d'heure). Par ailleurs, la question se pose également pour les intermittences plus longues, pendant quelques heures nuageuses, durant la nuit et lors des journées sans vent ni grand soleil. Augmenter les productions classiques mises en attente ne peut être la seule solution.

PALIER LES INTERMITTENCES

Dans un monde idéal engagé dans la transition énergétique, nous aurons besoin de stockage bon marché, sécurisé et suffisamment performant pour atténuer des fluctuations tant rapides que lentes, favoriser le développement des productions individuelles locales, soutenir la stabilité du réseau par des moyens non carbonés, stocker massivement l'électricité pour une mise à disposition modulable de l'électricité verte... Dans cette gamme de besoins, le stockage par batteries a un rôle important à jouer, mais plusieurs défis restent à relever.

Aujourd'hui, le stockage de l'énergie électrique par batterie est essentiellement fondé sur la technologie lithium-ion. Cette technologie est assurément mature, mais pas complètement

industrialisée en pratique. Il importe donc de développer un savoir-faire autour de ce type de batterie. ENGIE s'y emploie et s'attache à relever les défis technologiques et opérationnels qui ralentissent son expansion : vieillissement de la cellule électrochimique, sécurisation du système de stockage complet, recrutement en mode stationnaire des batteries automobiles, pilotage de batteries en « flotte » ou isolées...

Toutefois, pour certains usages, comme le stockage massif ou saisonnier, la technologie lithium-ion ne sera pas toujours optimale ni abordable. En effet, fournir une puissance électrique (les watts) satisfaisante est actuellement relativement bon marché, mais ce n'est pas le cas pour l'énergie électrique (les wattheures). D'autres technologies sont indispensables, et plusieurs font d'ores et déjà l'objet de grands efforts de développement. Outre les performances, on espère améliorer la sécurité tout en diminuant les coûts. Ainsi, les batteries lithium-soufre, redox à flux, à électrolyte solide, les batteries sodium-ion ou métal-air... sont évaluées ou testées par ENGIE en laboratoire, voire en démonstrateur. Certaines de ces technologies combinent longue durée de vie à coût réduit et cycle de vie durable par rapport aux technologies actuelles qui ne font qu'ouvrir la voie. La route sera-t-elle longue ?

ANTARCTIQUE ET LITHIUM-ION

Les batteries qui équipent la station Princesse Elisabeth, installées par Engie en 2008, relèvent d'une technologie centenaire (plomb-acide avec un électrolyte sous forme de gel, permettant de coucher la batterie, plutôt que de devoir la garder debout). Ce ne fut pas une mince affaire de manipuler manuellement des tonnes de matériel dans des conditions de gel intense ! Mais tout fonctionna correctement : la base zéro émission profita dès sa mise en service d'une énergie totale de 400 kilowattheures.

A cette époque, il était trop tôt pour envisager l'utilisation du lithium-ion. En Antarctique comme dans les applications spatiales, le prix n'était pas le facteur limitant. Prévalait plutôt le retour sur expérience en termes de durée de vie (dans un tel environnement) et plus encore de sécurité. Aujourd'hui, plus de quarante ans après ses balbutiements, le lithium-ion a finalement pris sa place dans les applications mobiles et de mobilité, où la taille et le poids de la batterie sont clés. Pour les applications stationnaires, en revanche, ces contraintes sont moindres et

UNE VICTOIRE AU SOLEIL !



© agorasci arteam

Gagner une course, c'est bien gérer son capital énergie... L'équipe qui a remporté l'édition 2019 du World Solar Challenge

(la « coupe du monde des véhicules solaires »), en Australie, en a apporté la preuve en faisant confiance à ENGIE pour la conseiller sur ce point. Les atouts pour prétendre à la victoire sont un véhicule économe, une bonne production solaire embarquée... et une batterie dont on connaît parfaitement les caractéristiques. Il s'agit de l'exploiter au mieux en fonction du vent contraire, du relief, de la température... sans tomber à court en vue de la ligne d'arrivée, mais également sans marge de sécurité trop importante.

Grâce au Storage Lab d'ENGIE, qui a testé les cellules pressenties et a prodigué des conseils de mise en œuvre, les gagnants ont profité d'un pack de batteries homogène sans cellules en surexploitation. Ils étaient informés à tout moment de l'état de charge réelle de la batterie et pouvaient optimiser les batteries avant chaque étape. Cette gestion précise de l'énergie fut décisive.

“ Pour certains usages, la technologie lithium-ion ne sera pas toujours optimale ni abordable ”

doivent nous permettre de choisir une technologie faisant appel à des matériaux plus communs, moins controversés, et par conséquent encore moins chers en théorie.

Faudra-t-il attendre encore quatre décennies pour remplacer le lithium-ion ? Probablement pas,

mais au moins une décennie devra s'écouler avant qu'on ne trouve et améliore le bon candidat. La circonspection sera de mise, car l'intensité de la recherche dans ce domaine et la chasse aux soutiens financiers peuvent générer bon nombre d'annonces de « résultats sensationnels », mais finalement non confirmés, et propres à semer le doute.

En attendant, malgré les imperfections du lithium-ion, ENGIE continue à parfaire son intégration chez les utilisateurs, dans le réseau électrique ou les territoires encore non électrifiés. Tout un programme qui devient concret à grande vitesse. ■

RÉFÉRENCE

Le site de l'équipe gagnante du World Solar Challenge 2019 : www.solarteam.be/

Un mariage de raison

Les opérateurs devront disposer d'importantes capacités de stockage de longue durée pour garantir la résilience du système électrique. Le stockage de gaz sera en mesure d'assurer ce rôle en convertissant l'excédent d'électricité d'origine renouvelable en hydrogène.

LES AUTEURS

CAROLE LE HENAFF,
GRÉGOIRE HÉVIN,
CHRISTIAN HUE ET
DELPHINE PATRIARCHE,
STORENGY

Depuis le lancement du *Green New Deal*, en décembre 2019, l'Union européenne est engagée dans un agenda positif, tourné vers l'avenir, avec des propositions propices à faire de la transition écologique un relais de croissance, dans l'intérêt de ses citoyens et entreprises.

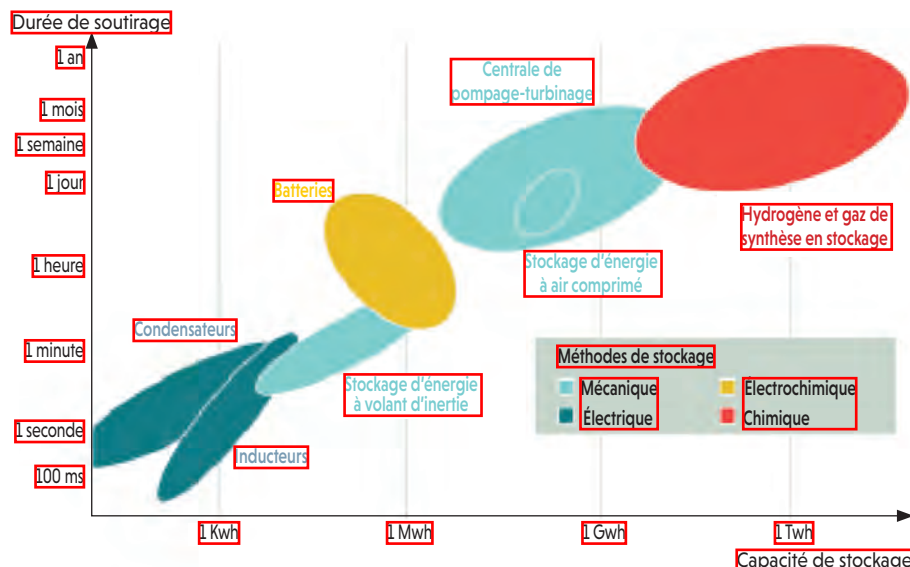
Dans ce mouvement irrésistible, les réseaux gaz et électricité ne peuvent plus être considérés isolément. Ils doivent au contraire être vus comme deux éléments indissociables d'un ensemble plus vaste – le système énergétique –, où le stockage de gaz, en tant que principal outil de flexibilité intersectoriel, relie intimement les deux secteurs. Ces liens se sont particulièrement renforcés ces dernières années.

En effet, l'intégration des énergies renouvelables accroît le besoin de flexibilité en électricité pour répondre à leur intermittence, alors même que l'équilibre du réseau se retrouve fragilisé par l'abandon progressif des autres sources ajustables à la demande (nucléaire, charbon, pétrole...). Par ailleurs, l'électrification d'une partie de la demande finale en énergie amène le réseau électrique à devoir répondre à une demande fluctuante, avec des fortes variations incluant des pics. Ce besoin d'adaptabilité, qui épargnait jusqu'alors le réseau électrique, car la demande était plutôt stable, implique de disposer de suffisamment de capacité de stockage pour soutenir la production électrique de plus en plus imprévisible et fluctuante.

La question de la flexibilité en électricité devient un enjeu clé pour la stabilité du système. Tous les types de stockage ont un rôle à jouer, mais la plupart sont limités en termes de niveau de capacité de stockage et de durée de soutirage (voir la figure ci-dessous). Ce n'est pas le cas du stockage de gaz, appelé à devenir le principal lien entre gaz et électricité.

Aujourd'hui, la flexibilité repose essentiellement sur le stockage de gaz naturel. Demain, elle devra se tourner vers les renouvelables. C'est notamment le sens du concept « Power to Gas ». L'idée est de transformer l'électricité issue d'énergies renouvelables en hydrogène pour fournir à terme la flexibilité nécessaire aux réseaux énergétiques. Plus précisément, grâce à l'électricité, de l'eau est scindée par électrolyse pour produire de l'hydrogène (H_2) qui sera utilisé soit directement, soit, dans une deuxième étape, pour produire du méthane (CH_4) par combinaison avec du CO_2 par un procédé catalytique.

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE



Les diverses techniques de stockage de l'électricité se distinguent en termes de capacité de stockage ou de durée de soutirage. Le stockage sous la forme de gaz représente la meilleure solution.

HYDROGÈNE EN SOUS-SOL

Le gaz renouvelable devient ainsi un complément à l'électricité renouvelable. ENGIE, à travers sa filiale Storengy, investit dans les technologies qui permettront d'adapter ses actifs de stockage à cette transition vers le zéro carbone. On pourra dès lors stocker massivement tout excès d'électricité renouvelable, actuellement perdu et délesté pour éviter de contraindre davantage les équipements et perturber l'équilibre du réseau.

Ces principes sont au cœur du projet *STOPIL H₂*. Il s'agit de la réalisation d'un pilote de stockage d'hydrogène en cavité saline à Étrez, dans l'Ain, à 20 kilomètres au nord de Bourg-en-Bresse. Le sous-sol aux alentours de la commune recèle 25 cavités

en exploitation creusées dans une couche de sel de 650 mètres d'épaisseur entre 1 250 et 1 900 mètres de profondeur. Les grandes quantités de gaz ainsi confinées, facilement disponibles, permettront de répondre à des besoins de consommation de base ou de pointe.

Cette technologie, mature et performante, bénéficie d'un retour d'expérience de plus de cinquante ans avec le gaz naturel. Elle offre des avantages intrinsèques environnementaux et en termes de sécurité (faible espace occupé en surface, confinement du produit, inaccessibilité du fait de la profondeur, absence d'oxygène à proximité...).

Le projet *STOPIL H₂*, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR), fédère des acteurs français reconnus (Storengy, Geostock, Air Liquide, BRGM, Ineris, Brouard Consulting et Armines représentant l'École des mines de Paris et Polytechnique). Il vise à totalement maîtriser les défis techniques spécifiques du stockage d'hydrogène en cavité saline.

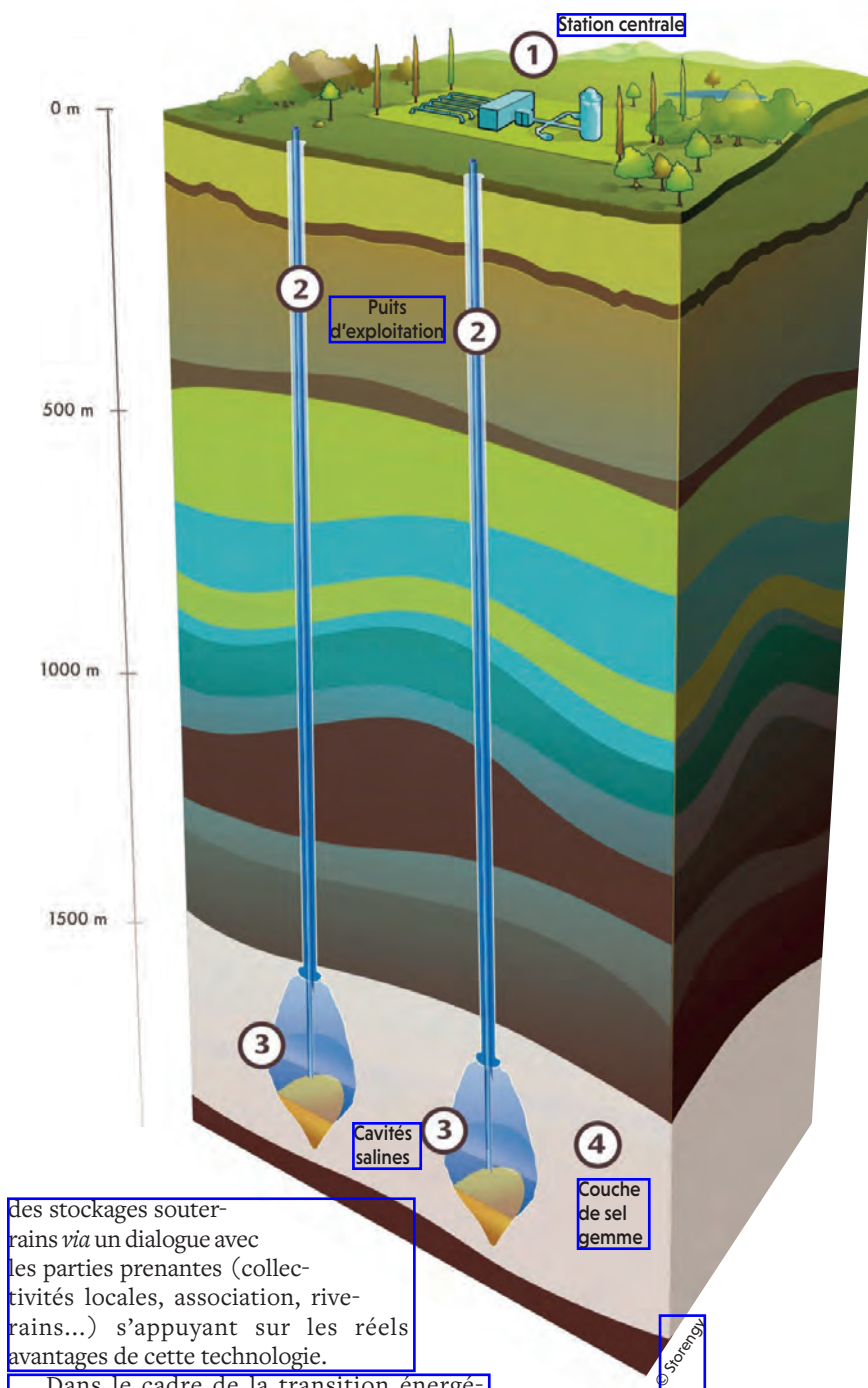
La première phase du projet, l'étude de faisabilité, consiste d'ici fin 2020 à répondre à deux questions. Une cavité de stockage dans le sel est-elle imperméable à l'hydrogène ? Des cycles fréquents d'injection et de soutirage d'hydrogène et de grande amplitude peuvent-ils porter atteinte à la stabilité mécanique d'une cavité ?

Concernant la première, l'étanchéité de la cavité et du puits est en effet une préoccupation essentielle du point de vue de la sécurité et de l'efficacité du stockage. Avec des hydrocarbures, dont il existe des milliers de cavités de stockage dans le monde, cette étanchéité est vérifiée. Dans le cadre de *STOPIL H₂*, un essai d'étanchéité à l'hydrogène sera effectué dans une cavité à environ 1 000 mètres de profondeur à Étrez (voir la figure ci-contre). L'objectif est d'obtenir des informations en vue d'industrialiser les tests d'étanchéité des futures cavités d'hydrogène.

EXPLOITATION DES CAVITÉS

Quant à la deuxième question, il est prévu un essai lors duquel l'hydrogène au sein de la cavité sera porté à une pression maximale (de l'ordre de 150 bars), celle-ci variant ensuite rapidement avant de revenir à sa valeur initiale. On saura alors si l'exploitation d'une cavité peut se faire sans désordre significatif de performance avec des cycles de pression courts et intenses, à l'instar de ce qui est aujourd'hui maîtrisé pour le stockage de gaz naturel. Une fois le concept validé, la cavité pourrait au final stocker jusqu'à 40 tonnes d'hydrogène, soit de l'ordre de 1,5 gigawattheure, destinées à court terme à une consommation locale.

Le principe acquis et étayé par de solides études scientifiques, les acteurs devront veiller à l'acceptabilité sociétale du développement



des stockages souterrains *via* un dialogue avec les parties prenantes (collectivités locales, association, riverains...) s'appuyant sur les réels avantages de cette technologie.

Dans le cadre de la transition énergétique, le stockage souterrain de gaz, autres que le gaz naturel, sera alors primordial et essentiel au développement des nouvelles sources et consommations électriques. La performance des stockages devra répondre aux caractéristiques de l'intermittence des sources de production électrique. Pour réussir un mix électrique 100% renouvelable demain, il est nécessaire d'investir dès à présent dans l'innovation technologique pour réduire les coûts d'investissement et rendre le cadre réglementaire plus propice à l'intégration des gaz renouvelables et à leur stockage. Alors seulement on pourra répondre positivement aux échéances fixées par l'Union européenne. ■

La cavité expérimentale de Storengy, à Étrez, dans l'Ain, aidera à étudier le stockage d'hydrogène en cavité saline.

Une mobilité électrique rêvée

AUTEUR

**LAURENT DE VROEY,
ENGIE RESEARCH**

L'essor de la mobilité électrique des véhicules légers passe par le déploiement d'une infrastructure performante et de flux énergétiques maîtrisés. Les solutions existent.



2020 **Lundi matin.** Au sortir d'une nuit trop courte, le point info trafic est sans appel : ma journée commencera dans les bouchons, et je dois en plus faire le plein ! Sur le réseau routier saturé, je suis entouré de véhicules, anonymes, avec un unique occupant. L'horloge et les moteurs tournent, mais les roues... En ville, nouveau défi : trouver une place. Enfin, le bruit des moteurs et les gaz d'échappement accompagnent les derniers mètres à pied. Vivement le bureau !

2035. Lundi matin. Après une nuit toujours trop courte, mais plus longue d'une heure. Mon appli préférée m'indique la meilleure option de mobilité du jour : voiture électrique partagée jusqu'à la gare, train puis deux-roues électrique en libre accès. En ville, l'effervescence est la même, mais quel bonheur pour les oreilles et le nez depuis la fin des moteurs thermiques en agglomération ! La multimodalité et la mobilité électrique ont vraiment changé la donne. Comment a-t-on pu attendre si longtemps ?

Pour gérer un parc de voitures électriques, une gestion intelligente des recharges s'impose.

Besoin pratique ou vecteur de liberté, la mobilité et le transport sont des piliers de nos sociétés. L'indispensable réduction significative des émissions de CO₂ dans le secteur des transports incite un nombre croissant d'acteurs publics et privés à favoriser la mobilité électrique. Toutefois, l'essor de cette dernière impose que de nombreuses questions pratiques pour l'utilisateur et pour la société soient résolues. Elles se posent notamment en termes de recharge des véhicules électriques, tant au niveau des infrastructures requises que des flux énergétiques mis en jeu.

UNE INFRASTRUCTURE OPTIMISÉE

Plusieurs options s'offrent aux concepteurs pour déployer une infrastructure de recharge à même de satisfaire les besoins. D'abord, un premier paramètre est celui de la rapidité de recharge. Une simple prise murale ajoute à une voiture 10 à 15 kilomètres d'autonomie par heure de recharge. Une borne de recharge normale délivre dans le même temps jusqu'à

100 kilomètres d'autonomie. Une borne de recharge rapide (plus volumineuse et plus complexe) fait de même en seulement 15 minutes. Cependant, la rapidité de la recharge pose des questions de puissance, nous y reviendrons. Autre critère, la technologie de recharge : elle peut être conductive ou inductive selon que le véhicule est alimenté par un câble électrique ou sans fil (dans le premier cas, le rendement est meilleur, mais la seconde option est plus pratique). Diverses architectures de recharge sont également disponibles selon les utilisations : sur borne, par pantographe, ce bras articulé qui se déploie par exemple au-dessus des bus électriques... En fonction des choix, la recharge a lieu lorsque le véhicule est à l'arrêt ou même en mouvement.

MATURITÉ ET VIEILLISSEMENT

Pour s'y retrouver dans ce champ des possibles, ENGIE étudie ces différentes solutions et s'intéresse en particulier à leur maturité, leur impact sur le vieillissement des véhicules, leur interopérabilité et leur potentiel de déploiement à moyen et long termes. Pour ce faire, les chercheurs procèdent à des évaluations régulières et approfondies des solutions et technologies de recharge, que ce soit lors de tests en laboratoire ou en environnement ouvert, ou bien dans le cadre d'analyses approfondies de solutions déployées aux quatre coins du monde.

Ont ainsi été testés, par exemple, l'impact sur le vieillissement des batteries de la recharge rapide par rapport à la recharge normale et la possibilité pour la voiture de renvoyer de l'énergie au bâtiment ou au réseau. La facilité d'installation et d'usage de différentes solutions de recharge a aussi été évaluée en conditions réelles.

PLUS VITE, MOINS CHER ET SANS SOUCI

En limitant les investissements, en réduisant les puissances et le nombre de chargeurs nécessaires, la recharge dite « intelligente » offre de nombreux avantages aux utilisateurs ainsi qu'aux gestionnaires de sites de recharge et de réseau électrique. Elle consiste à adapter la recharge des véhicules aux autres consommations du site et à maximiser l'utilisation de l'énergie produite localement, par exemple par des panneaux solaires. Un nombre croissant de solutions commerciales proposent une partie de ces fonctionnalités. Elles se retrouvent toutes dans SMATCH, la solution de recharge de véhicules électriques d'ENGIE. En outre, SMATCH prend en compte les besoins spécifiques de chaque utilisateur, anticipe les productions locales, les consommations et les besoins des véhicules. Elle tient également compte des contraintes du réseau, des tarifs du marché de l'énergie et de la production de CO₂ par le mix énergétique, variable dans le temps.



L'autre ressort du déploiement de la mobilité électrique concerne la quantité d'électricité nécessaire pour alimenter l'ensemble des véhicules et sa disponibilité. Cette question est directement liée au nombre et à la taille des batteries mises en fonction. En Europe, une mobilité et un transport entièrement électrifiés entraîneraient une augmentation de 15 à 20 % des besoins en énergie électrique. Cet accroissement est certes significatif, mais il restera gérable s'il est étalé dans le temps.

UN BESOIN DE PUISSANCE

Autre facteur essentiel, la rapidité de la recharge pose, nous l'avons vu, des problèmes de puissance. Le rechargement d'une seule voiture électrique dans un temps équivalent à celui d'un traditionnel plein de carburant nécessiterait la puissance délivrée par une éolienne tournant à plein régime. C'est inimaginable en pratique. Qui plus est, le réseau électrique n'est pas partout suffisamment dimensionné pour permettre les appels de puissance simultanés d'un grand nombre de véhicules électriques. Dans ce cas, une gestion intelligente des recharges est essentielle.

De plus, la façon dont les véhicules sont rechargés peut occasionner des anomalies sur le réseau électrique (chutes de tension, surcharge de transformateurs, variation de fréquence, etc.). Au-delà de certaines limites, ces perturbations requièrent des interventions coûteuses. Pour y faire face, ENGIE évalue, avec différents gestionnaires de réseau électrique, les impacts qualitatifs et quantitatifs de ces perturbations, par des mesures détaillées de cycles de charge, pour différents types de chargeurs et véhicules électriques.

Répondre à ces problématiques est d'autant plus important que la mobilité électrique, appelée à se développer, est aujourd'hui bien accueillie. Des études montrent que 95 % des utilisateurs de voitures électriques ne voudraient pas revenir à une motorisation thermique.

De nouvelles opportunités s'ouvrent alors. Selon les besoins, on peut imaginer les véhicules fournir de l'énergie aux bâtiments ou au réseau. Ces nouvelles perspectives d'usage des batteries aideraient à maximiser la consommation locale des productions renouvelables intermittentes. Le même concept peut s'étendre à des communautés locales d'énergie, où la production électrique d'un foyer participerait à la recharge du véhicule d'un voisin, et où le véhicule d'un autre alimenterait la maison d'un quatrième. Le développement de telles communautés impose de réels changements de paradigmes, dont la mobilité électrique n'est qu'une première étape. En vous impliquant dans de tels projets, le rêve de 2035 deviendra réalité, et vous dormirez plus longtemps ! ■

Vers des croisières plus propres

Afin de répondre aux nouvelles exigences environnementales qui lui sont imposées, l'industrie maritime peut compter, à court et moyen termes, sur de nouveaux carburants.



L'AIDAnova est le premier paquebot de croisière fonctionnant au gaz naturel liquéfié (GNL).

En 2018, l'AIDAnova fut mis en service par la compagnie Aida Cruises. Ce navire, construit par les chantiers Meyer Werft, était inédit : il s'agissait du premier paquebot de croisière fonctionnant au gaz naturel liquéfié (GNL). Cet exemple illustre l'engagement de l'industrie maritime vers une diminution de son empreinte écologique. Le chemin sera long, mais la tendance est irrémédiable...

LES AUTEURS
FRÉDÉRIC LEGRAND ET
GABRIELLE MENARD,
ENGIE LAB CRIGEN

Historiquement, le transport maritime utilise des fiouls lourds pour sa propulsion. Issus des fractions lourdes de la distillation du pétrole brut, ces carburants renferment les résidus les plus polluants, et notamment des composés soufrés. Leur combustion libère du CO_2 , des oxydes de soufre (SO_x) ainsi que des oxydes d'azote (NO_x) et des particules fines. Le transport maritime serait responsable d'un peu moins de 3 % des émissions globales de CO_2 en 2018, soit l'équivalent des émissions de l'Allemagne.

L'Organisation maritime internationale a décidé de réagir et a fixé des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (50 % d'ici à 2050 par rapport à 2008) et impose depuis 2015 une diminution progressive du taux maximal de soufre autorisé (de 3,5 % en 2015 à 0,5 % en 2020) dans les soutes de quelque 50 000 navires en circulation et dans toutes les mers du globe. Dans les zones à émissions contrôlées (dites SECA pour *Sulfur emissions controlled area*) qui comprennent les côtes nord-américaines et les mers d'Europe du Nord, la limite est encore plus restrictive avec un taux maximal de soufre de 0,1 %, appliqué dès 2015.

Pour répondre à ce défi, différentes solutions s'offrent aux armateurs. La première consiste à remplacer les fiouls lourds par du

gasoil marin ou des fiouls bas soufre, moyennant des modifications mineures des moteurs. Toutefois, les surcoûts opérationnels (les carburants de substitution sont sensiblement plus chers) de cette option sont importants et la question clé sur ce nouveau produit reste sa disponibilité et son prix qui va croître sous l'effet d'une demande plus importante. Dans un premier temps, ce sera par défaut la solution la plus massivement adoptée, car elle ne requiert pas d'investissement important.

LE CHOIX DES SOLUTIONS

Une autre piste est de rendre plus propre l'utilisation des fiouls lourds en mettant en place de nouveaux systèmes de récupération et de nettoyage des fumées. Cependant, cette solution n'est pas forcément adaptée à tous les navires et surtout, elle ne traite qu'une partie du problème en éliminant le soufre sans enlever les NO_x et les autres polluants. Cette solution offre le meilleur retour sur investissement, mais elle n'est pas sans risque sur la durée, car elle soulève la question du traitement des déchets soufrés. En outre, son bilan carbone est mitigé. En effet, le fonctionnement des dispositifs installés (des absorbeurs-neutralisateurs) augmente la consommation du navire et donc ses émissions de gaz à effet de serre. Au 1^{er} mai 2019, moins de 2 400 navires étaient concernés.

Dernière option, le changement complet de carburant. Il implique le plus souvent d'investir dans un nouveau navire, pour les armateurs ayant une stratégie à long terme. Les fiouls lourds sont alors remplacés par du GNL, voire, nous y reviendrons, par du bio-GNL ou de l'hydrogène. Aujourd'hui, le GNL est le plus largement utilisé, l'AIDAnova en témoigne. En effet le GNL répond à l'ensemble des exigences

environnementales puisqu'il supprime les émissions de soufre et de particules fines, réduit de 80 % celles de NO_x et de 20 % celles de CO_2 . Il est par ailleurs disponible en grandes quantités et les motorisations GNL pour des navires de différents tonnages sont disponibles. Son développement reste néanmoins limité, car la chaîne logistique de distribution du produit n'est pas encore adaptée à cet usage. Le retour sur investissement est aussi plus long.

Avec moins de 400 navires fonctionnant au GNL en service ou en commande, le marché est encore une niche, mais certaines études annoncent un potentiel de 35 millions de tonnes par an pour le GNL à l'horizon 2035, soit approximativement 10 % de part de marché. En 2017, ENGIE a lancé conjointement avec Mitsubishi, NYK line et Fluxys, l'armement du navire avitailleur *Engie Zeebrugge* (voir ci-dessous). Avec une capacité en GNL de 5 000 mètres cubes, il peut alimenter en carburant tout type de navire opérant en Europe du Nord à partir du port de Zeebruges, ce qu'il fera à partir de 2020, sous la marque Gas4Sea.

MIEUX QUE LE GNL

Pour répondre à ce nouveau marché, ENGIE a lancé des programmes de recherche ambitieux sur la production et l'utilisation des gaz verts pour le transport maritime. L'un d'eux répond au comportement thermodynamique complètement différent du GNL par rapport aux autres carburants. Le GNL est un liquide cryogénique dont la composition chimique évolue à mesure qu'il s'évapore en gaz naturel, celui qui est brûlé par les moteurs. Ces changements au cours du voyage se traduisent par l'évolution de paramètres primordiaux pour le fonctionnement des moteurs, dont l'indice de méthane (cet indice, lié à la composition du gaz, rend compte de la qualité de sa combustion). On pourrait installer un chromatographe pour suivre en continu la composition du GNL, mais l'appareil est cher. On peut désormais faire autrement : ENGIE Lab CRIGEN a développé Smart Gauge, un algorithme calculant la composition du GNL dans les soutes du navire tout le long du trajet à partir de la pression et de la température mesurées en temps réel et de la composition initiale.

Malgré son faible impact environnemental, le GNL ne permet pas d'éliminer complètement les émissions de CO_2 et de NO_x . Deux nouveaux carburants pourraient y remédier. Le premier est le bio-GNL (ou biométhane liquide). Il permet de réduire les émissions de CO_2 de 90 % par rapport aux fiouls lourds et ne nécessite aucun investissement supplémentaire pour un navire fonctionnant au GNL. Le développement du bio-GNL reste toutefois limité à cause de son coût de production. Fort de son expertise dans le GNL depuis plus de soixante ans, ENGIE Lab CRIGEN

a lancé un programme de recherche visant à réduire de 40 % le coût de liquéfaction du biogaz par des procédés innovants. En 2020, des tests seront réalisés sur le site du CRIGEN à Stains puis sur le terminal méthanier de Montoir-de-Bretagne pour valider le fonctionnement de la nouvelle technologie. L'objectif en 2021 est de pouvoir installer la solution chez un partenaire ENGIE. Le bio-GNL pourrait remplacer le GNL à l'horizon 2030.

À plus long terme, l'hydrogène liquide serait un carburant adapté à la mobilité maritime. De fait, à condition qu'il soit produit de façon renouvelable, son utilisation n'émet aucun gaz à effet de serre, ni NO_x , SO_x ou particules. Les solutions actuelles pour produire, stocker et transporter de l'hydrogène liquide restent limitées. ENGIE a lancé un programme de

“ Le transport maritime a largement entamé sa transition vers le zéro carbone ”



L'Engie Zeebrugge peut alimenter en GNL tout type de navire fonctionnant avec ce carburant.

recherche pour diviser par deux les coûts de production et de transport de ce liquide en développant de nouveaux procédés de liquéfaction. Des projets sont également en cours en Amérique du Sud pour proposer à des industriels des solutions de transport maritime à base d'hydrogène.

Contredisant sa réputation de secteur plutôt conservateur, le transport maritime a largement entamé sa transition vers le zéro carbone. Plusieurs solutions sont disponibles, et ENGIE accompagne les acteurs de cette filière pour réduire l'empreinte environnementale. Un jour, la croisière s'amusera avec bonne conscience. ■

Pour une industrie zéro carbone

Les industries gourmandes en énergie (les IEI) ont très tôt cherché à améliorer l'efficacité énergétique de leurs procédés. Les efforts se poursuivent, mais des ruptures technologiques sont nécessaires.

Autour de vous, pour peu que vous soyez citadin, quelques matériaux dominent le paysage : acier, ciment, verre... Ces produits omniprésents sont élaborés par les industries dites « énergie-intensives » (IEI) dont les émissions de gaz à effet de serre sont majeures, car fondées sur de nombreuses opérations très énergivores. Les puissances installées peuvent dépasser 200 mégawatts sur une seule installation, ce qui équivaut à une centaine de terrains de football équipés en panneaux photovoltaïques ! Au total, les secteurs acier-ciment-chimie représentent à eux seuls 5,4 gigatonnes de CO₂, soit plus de 15 % des émissions globales anthropiques. Dans ce contexte, comment parvenir à la neutralité carbone en 2050 ?

UNE COURSE DE VITESSE

Nous sommes à un point de bascule. Atteindre la neutralité carbone en 2050 implique à la fois de déployer des solutions allant bien plus loin que les meilleures techniques disponibles actuellement, et de s'engager dans une course de vitesse, l'horizon temporel étant proche au regard du temps nécessaire à de tels changements. À titre d'exemple, la durée d'exploitation d'un procédé cimentier ou sidérurgique dépasse souvent quarante ans. La recherche et le développement ont donc un rôle majeur à jouer, et ce dans plusieurs grandes thématiques.

L'une d'elles est l'efficacité des matériaux. Il s'agit de repenser le matériau pour lui conférer de meilleures performances. Le développement d'aciers plus légers par exemple réduit la consommation des véhicules.

Autre axe, l'intensification a pour but de tendre vers le « minimum d'énergie requis » (le MER) pour une transformation de la matière (chauffage, fusion, évaporation...). ENGIE accompagne les industriels dans cette démarche. On peut citer les travaux désormais à maturité industrielle dans le domaine des brûleurs à haute performance énergétique. Les rendements atteignent plus de 90 % grâce à un

LES AUTEURS

LUDOVIC FERRAND,
PHILIPPE BUCHET ET
JEAN-PIERRE KEUSTERMANS,
ENGIE

meilleur couplage entre le système de combustion et l'enceinte.

La piste de l'électrification est aussi intéressante. Les systèmes électriques des grands pays industriels sont en pleine mutation pour atteindre la neutralité carbone. Les infrastructures tendent à se complexifier avec la diversification et la décentralisation des sources.

Le premier avantage de l'électrification est la conversion directe en énergie verte (solaire, éolien, marine...). D'autre part, l'interaction avec

DÉCARBONER LE CIMENT



Usine pilote
LEILAC1.

© CALIX

L'industrie du ciment et du béton compte parmi les plus

larges émetteurs de CO₂, contribuant à près de 5 % des émissions mondiales. Poussé par la croissance démographique et l'urbanisation, la demande en ciment a explosé sur les dix dernières années et cette tendance ne semble pas près de s'inverser. Cependant, la mise en place d'une solution décarbonée pour cette industrie est complexe. En effet, si 30 à 40 % de ses émissions CO₂ proviennent de la combustion de fuel pour lequel des carburants alternatifs décarbonés peuvent être une solution, 60 à 70 % des émissions CO₂ proviennent du procédé de

calcination du CaCO₃, et dans ce cas, une technologie de rupture sera nécessaire. On peut penser au développement de ciment et de matériaux alternatifs, ou bien à la capture du CO₂. Dans ce dernier cas, le découplage de la combustion et de la réaction de calcination dans le four à chaux réduit considérablement les coûts énergétiques liés à cette capture. Une telle approche a été développée dans LEILAC, un projet collaboratif mené par Heidelberg Cement et Calix. La suite, LEILAC2, a déjà été annoncée et ENGIE est partenaire, de 2020 à 2025, pour la partie électrification de ce procédé novateur et celle de la valorisation du flux de CO₂.

DE LA VIGNE AU VERRE



A partir des sarments de vigne, on peut produire du biométhane exploitable par l'industrie verrière.

© Gabard

Si le verre peut être facilement recyclé après usage (50 % du verre d'emballage est constitué de verre recyclé), sa fabrication à très haute température requiert beaucoup d'énergie. Comment réduire cette

empreinte écologique notable ?

Trois options sont envisageables. Augmenter l'électrification des procédés de production de verre et utiliser de l'électricité renouvelable. Convertir les

fours, notamment de fusion de verre, à des combustibles renouvelables. Repenser et intensifier énergétiquement les procédés de production. ENGIE et un consortium d'industriels, notamment le verrier Verallia et la société

Xilowatt, se sont engagés dans la deuxième voie avec le projet *BioVive*. L'objectif, en trois ans, jusqu'en 2015, était de parvenir à alimenter un four de fusion de verre creux par un gaz de synthèse renouvelable (CO , H_2 , CH_4 ...) issu de la gazéification de la biomasse. Un pilote industriel a démontré la faisabilité de cette solution décarbonée. ENGIE poursuit par ailleurs ces travaux avec la mise en œuvre d'un procédé de production décentralisée de biométhane (le projet *Gaya*), vrai gaz naturel renouvelable, à partir de déchets ligneux issus de la taille de la vigne. D'autres solutions à base d'hydrogène vert produit de façon décentralisée sont à l'étude.

les IEI est évidente, tant ils seront des acteurs importants, de par leur capacité à jouer un rôle actif dans l'équilibrage des réseaux.

L'électrification peut être directe ou non. Dans le premier cas, on imagine en fonction des matériaux un chauffage par rayonnement effet Joule, par infrarouge, par induction... ENGIE est ainsi impliqué dans le projet de recherche européen *Destiny* pour les applications en céramique, ciment et acier, et dont l'objectif est de développer un nouveau concept de chauffage par microondes de matériaux granulaires.

HYDROGÈNE, BIOMASSE...

L'électrification indirecte regroupe les solutions où l'électron est transformé en un vecteur intermédiaire, comme l'hydrogène dans le « Power to Hydrogen », pour l'usage final, tel un chauffage à haute température. ENGIE a participé à la validation du concept pour les procédés industriels dans le cadre du Plan d'action national sur l'hydrogène. D'autres initiatives, tel le projet européen *Hybrit*, visent à remplacer le coke par de l'hydrogène dans les aciéries.

Les combustibles issus de la biomasse ont aussi un rôle à jouer dans la transition énergétique, et de fait, certains hauts-fourneaux sidérurgiques fonctionnent déjà avec de l'eucalyptus transformé en un équivalent de coke. Ce principe, encore difficilement transposable

partout, est un champ de recherche actif. Le projet *BioVive* mené par ENGIE est à ce titre emblématique (voir l'encadré ci-dessus).

La symbiose industrielle peut aussi aider à atteindre la neutralité carbone. Elle consiste à convertir les flux sortants (matière ou énergie) d'un acteur en ressources pour un autre. L'idée rencontre des difficultés à se déployer largement, même si de grands succès existent. ENGIE, via son outil *Be-Circle*, contribue à identifier et optimiser le potentiel des circularités sur un territoire géographique donné en modélisant les flux des industries d'une zone industrielle.

Dernière thématique, les IEI se prêtent bien à la capture du CO_2 , car par exemple les sources sont souvent concentrées sur un émetteur principal. Les travaux de recherche et les pilotes de démonstration se multiplient. L'objectif est à la fois de déterminer les procédés de captation les plus efficaces, et d'identifier les voies de réutilisation du CO_2 pour éviter son rejet dans l'atmosphère.

Ce panorama, loin d'être exhaustif, montre la diversité des approches et l'ambition allant au-delà de l'efficacité énergétique pour se tourner résolument vers la neutralité carbone. L'effort global à fournir reste immense, mais de nombreuses pistes sont prometteuses, pour qu'un jour, nous portions un nouveau regard sur les matériaux qui nous entourent. ■

L'avenir des pompes à chaleur

Pour fournir de la chaleur à basse et moyenne températures dans l'industrie, des pompes à chaleur innovantes aideront à tenir les objectifs imposés par la transition énergétique.

LES AUTEURS

AKIM RIDA ET
JEAN-YVES DRUILLENNEC,
ENGIE

En 2019, le gouvernement a promu le dispositif « Coup de Pouce Chauffage ». Il s'agissait d'aider financièrement les ménages à remplacer leur ancien équipement de chauffage par un matériel plus performant, et notamment des pompes à chaleur. Qu'en est-il des entreprises ?

Elles ont aussi pris la mesure des problématiques environnementales, et cherchent à réduire leur empreinte carbone. Cela passe entre autres par la décarbonation de la chaleur industrielle. L'enjeu est significatif, car à l'échelle mondiale, 32 % de l'énergie finale (celle consommée concrètement par les utilisateurs) est captée par l'industrie, les trois quarts répondant à des besoins de chaleur. Et la moitié de ces derniers correspond à des basses (moins de 100 °C) et moyennes températures (moins de 400 °C). Il y a donc là un levier important sur lequel jouer pour décarboner le monde industriel.

Deux des pistes essentielles sont l'amélioration de l'efficacité énergétique et la biomasse solide (bois, déchets verts, résidus agricoles...) avec notamment le verdissement des réseaux de gaz naturel. D'autres sont attentivement étudiées, liées notamment aux symbioses industrielles (les déchets ou les sous-produits d'un processus industriel deviennent les matières premières d'un autre) ou à des procédés innovants.

Au-delà, beaucoup de scénarios envisagent le déploiement de chaudières électriques ou hybrides et surtout, avec un meilleur rendement espéré, des pompes à chaleur (PAC) à l'instar de ce qui se passe chez les particuliers. Cependant, de tels dispositifs restent à développer pour des températures comprises entre 120 et 200 °C. Les travaux sont en cours !

LES PAC AUJOURD'HUI

Rappelons que la pompe à chaleur est un dispositif qui permet d'effectuer un transfert de chaleur d'une source telle que l'air, le sol, l'eau souterraine ou, très souvent dans l'industrie, un rejet de chaleur qui aurait été autrement perdu (chaleur fatale), vers un utilisateur, par exemple pour alimenter un procédé industriel.

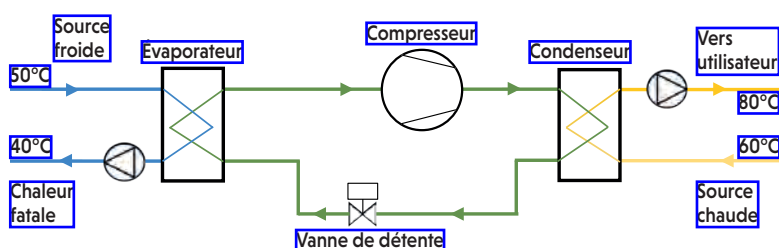
Ce dispositif fait subir un cycle de transformations à un fluide de travail ou réfrigérant : il absorbe de la chaleur dans un évaporateur, chauffe dans un compresseur et libère de la chaleur dans un condenseur. Le tout est complété par un appareil de détente.

Le coefficient de performance (COP) rend compte de l'efficacité du pompage. Il correspond au rapport de la chaleur fournie par la PAC sur l'énergie consommée, souvent l'électricité, par le compresseur.

Dans les PAC commercialement disponibles, les cycles contiennent en général soit un compresseur mécanique de vapeur soit un système à absorption. Dans ce dernier, une vapeur est dissoute dans une solution, celle-ci étant ensuite pompée à une pression plus élevée où un corps volatil est séparé par évaporation (désorption). L'énergie consommée par la pompe est beaucoup plus faible qu'avec un compresseur, mais il faut fournir une chaleur de bonne qualité au désorbeur. Des PAC dites « hybrides » combinent la compression de vapeur et l'absorption.

Dans la famille des PAC à compression mécanique ou hybride, plusieurs solutions technologiques émergent et sont désormais capables de fournir de la chaleur à plus de 110 °C. En particulier, la PAC Thermeco2 de Engie fonctionne avec une source de chaleur comprise entre 8 et 40 °C pour élever la température d'un fluide jusqu'à 110 °C. Elle utilise le CO₂ comme fluide de travail qui a l'avantage d'être non toxique, non inflammable, pas cher, sans impact sur la couche d'ozone et avec un potentiel de réchauffement climatique

ANATOMIE D'UNE POMPE À CHALEUR



Une pompe à chaleur (PAC) transfère de l'énergie thermique d'un milieu à basse température (en bleu) vers un milieu à haute température (en jaune).



Début 2018, la pompe à chaleur hybride Green PAC a été installée à la Compagnie des Fromages & RichesMonts à Vire (14). En exploitant la chaleur fatale rejetée par les installations de production de froid, elle fournit annuellement sept gigawattheures d'eau chaude à 85 °C pour les besoins de nettoyage, de stérilisation et production. Les émissions de CO₂ liées à la production de chaleur ont radicalement chuté de 90 %.

peut être chauffée jusqu'à 120 °C pour une pression du fluide de travail réduite à 25 bars, là où une PAC utilisant de l'ammoniac pur serait limitée à 50 °C. Au point de fonctionnement de 40/100 °C, le COP est de 4,5.

Produire et distribuer de la chaleur sous forme d'eau chaude là où on utilise souvent de la vapeur est un vrai frein au déploiement parce qu'une modification significative des procédés utilisateurs est nécessaire, notamment l'installation d'un nouvel échangeur de chaleur. Des PAC autorisant la production de vapeur entre 150 et 200 °C ouvriraient de nombreuses opportunités. Les développements actuels des PAC visent à améliorer le COP et à augmenter le niveau de température à 200 °C. Le manque de réfrigérants avec un faible impact environnemental est la principale barrière.

“ La décarbonation de la chaleur basse et moyenne températures dans l'industrie est à la croisée des chemins ”

comparativement très faible par rapport à la plupart des réfrigérants utilisés aujourd'hui. Le cycle, dit « transcritique », est original, car il se déroule en partie en phase supercritique : en sortie de compresseur, le fluide de travail est à une pression supérieure à sa pression critique, point au-delà duquel, pratiquement, le CO₂ peut être refroidi, mais ne se condense pas. Le condenseur classique est donc remplacé par un refroidisseur de gaz.

Autre exemple, la PAC hybride Green PAC a été développée en Norvège par l'Institut des technologies énergétiques, puis par la société Hybrid Energy. Après un accord de partenariat conclu en 2015, ENGIE Solutions assemble ces systèmes sur mesure à Montauban-de-Bretagne en Ille-et-Vilaine. Cette PAC combine les principes de l'absorption et de la compression et fonctionne avec un mélange d'eau et d'ammoniac. Ce fluide naturel est zéotropique, c'est-à-dire que sa température varie lorsqu'il change d'état : grâce à lui, par rapport à une PAC classique, les échanges de chaleur au condenseur et à l'évaporateur sont améliorés, conduisant à un meilleur COP. Grâce à cette approche, de l'eau

LES PAC DE DEMAIN

Une application directe des PAC très haute température consiste à exploiter des sources de chaleur renouvelable basse température (solaire, géothermie, chaleur fatale...) pour produire de la vapeur en parallèle d'une chaudière existante. Une PAC générant de la vapeur doublerait au moins le rendement d'une chaudière électrique. L'utilisation d'électricité verte rendrait ce système entièrement décarboné. Ce principe fait l'objet d'un produit commercialisé pour de la vapeur à une température encore modeste de 120 °C (la SGH120 de Kobe Steel). Un COP de 3,5 est annoncé avec une source de chaleur fatale à 65 °C. Kobe Steel propose d'aller plus loin en ajoutant une étape de compression de la vapeur d'eau de 120 à 165 °C. Le COP est supérieur à 2.

La décarbonation de la chaleur basse et moyenne températures dans l'industrie est aujourd'hui à la croisée des chemins. Il n'y a pas de solution universelle. C'est que la chaleur est plurielle et que la température a un coût. L'idée d'un bouquet de solutions paraît la plus adaptée à la diversité des situations rencontrées. L'efficacité énergétique en fait partie, c'est peut-être la seule certitude aujourd'hui. ■

■ CHAUD OU FROID, MÊME COMBAT

L'objectif de la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires est ambitieux (17 % en France). C'est un défi tant il faut tenir compte du faible taux de renouvellement des bâtiments, des dizaines

de millions de propriétaires et autres parties prenantes, des divers regroupements en villages, quartiers, villes... Néanmoins des solutions existent, et que ce soit pour le chauffage (ci-dessous) ou à l'inverse pour la climatisation

(voir page XXIV), elles ont étonnamment beaucoup en commun, notamment lorsqu'il s'agit de répondre aux pointes de consommation, journalières et saisonnières. Toutes passent par la diminution de la demande, l'utilisation de

ressources renouvelables, la mise à disposition de solutions techniques, organisationnelles et financières innovantes... La convergence des réseaux électrique, de gaz, de chaleur et de froid sera également un acteur clé de la réussite.

Chauffer sans réchauffer... le climat !

On ne parviendra à réduire l'empreinte carbone du chauffage qu'en associant électricité et gaz plutôt qu'en les opposant.

« **B**ataille des radiateurs », « les esprits s'échauffent »... Les médias rivalisent d'esprit quand ils rendent compte des négociations entourant l'élaboration de la nouvelle réglementation environnementale, dite « RE 2020 », qui doit définir le mode de chauffage privilégié dans les bâtiments neufs. De fait, le débat fait rage entre les défenseurs du tout électrique et ceux du gaz, chacun espérant faire pencher les arbitrages en faveur de sa solution. Quels sont les tenants et les aboutissants de cette question ?

Ces trente dernières années, la performance du chauffage s'est fortement améliorée avec le remplacement progressif du fioul et du charbon par le gaz naturel et l'électricité, la production de cette dernière ayant par ailleurs évolué vers le nucléaire, l'hydraulique et le gaz naturel. Selon l'Ademe, les émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage, à surface équivalente, ont été divisées par trois depuis 1975. Cependant, avec

400 térawattheures, le chauffage correspond tout de même à un quart de l'énergie finale globale consommée en France. C'est donc un secteur clé pour atteindre la neutralité carbone.

Aujourd'hui, le gaz naturel et l'électricité dominent largement les énergies dédiées au chauffage (voir le graphe ci-dessous). L'électricité n'est pas une énergie primaire et n'est donc pas disponible dans la nature : c'est un vecteur énergétique issu de la transformation d'énergies primaires (gaz naturel, uranium, vent, rayonnement solaire...). L'examen des sources d'énergie primaires sollicitées par le chauffage électrique montre une tout autre répartition, certes dominée cette fois par le nucléaire (environ 50 %), mais avec une part fossile loin d'être faible.

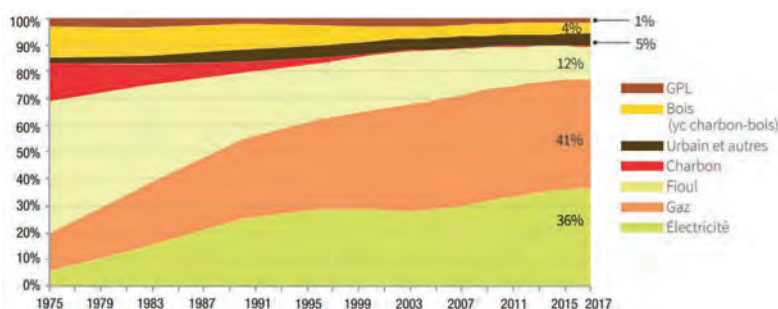
UNE QUESTION D'ÉQUILIBRE

La place des énergies dans le mix de demain n'est donc pas tant une question de gaz naturel et d'électricité, mais plutôt d'équilibre entre différentes énergies primaires. Une partie des ressources renouvelables sont par nature uniquement valorisables en électricité (éolien, photovoltaïque...), et d'autres, comme les gaz renouvelables et le solaire thermique, peuvent être utilisés directement pour le chauffage.

Cependant, l'électricité se heurte à ses limites lorsqu'il s'agit de composer avec les variations de consommation journalières et surtout saisonnières. La difficulté pour le système électrique est à la fois de pouvoir démarrer des moyens de production électrique dédiés à l'hiver, et d'assurer le dimensionnement des réseaux autour d'une pointe somme toute brève.

Faisons un petit calcul. En 2019, la « pointe » énergétique des bâtiments a été estimée à 280 gigawatts, dont 85 ont été fournis par le réseau électrique. Leur demande énergétique minimale est de 80 gigawatts. Ainsi, dans une

LA RÉPARTITION DES ÉNERGIES DÉDIÉES AU CHAUFFAGE



Le gaz naturel et l'électricité dominent largement les énergies dédiées au chauffage. On constate une prépondérance de l'électricité dans le secteur des bâtiments neufs, mis à part en logements collectifs chauffés majoritairement au gaz naturel.



© Carlos Castil / Shutterstock.com

Dans les bâtiments,
quel chauffage choisir ?
Au gaz ou électrique ?

année 2019 virtuelle où tous les bâtiments seraient équipés en chauffage électrique, 200 gigawatts devraient être mis en réserve, et sollicités uniquement lors d'une pointe hivernale. C'est l'équivalent de 120 EPR ou 250 centrales à gaz dernier cri... qu'il faudrait éteindre l'été.

À cette aune, quelle trajectoire peut-on imaginer pour atteindre la neutralité carbone en 2050 ? D'abord, l'ampleur du problème de la pointe hivernale de chauffage doit être attaquée à la racine. Répétons-le, la première étape est la réduction drastique et rapide de la demande énergétique des bâtiments : la chasse aux fuites thermiques est ouverte depuis quelques années et doit s'intensifier.

Deuxième front, les systèmes de production de chaleur doivent être aussi efficaces que possible lorsqu'ils s'appuient sur des ressources pilotables, qu'elles soient renouvelables (biomasse, gaz renouvelables) ou non (mais bas-carbone, comme le nucléaire de type EPR). Par ailleurs, il est nécessaire d'adosser au solaire, à l'éolien et à l'hydraulique des capacités de stockage. En effet, des moyens de production peu pilotables sont peu utiles pour suivre l'évolution des demandes en particulier lors de la pointe hivernale. Parmi les capacités de stockages, chacune a ses défauts et ses qualités. Citons les batteries (dont le bilan environnemental peut poser question), les stockages mécaniques, les stockages thermiques (dans de l'eau, ou d'autres matériaux plus complexes), ou sous forme d'hydrogène, qui est alors un gaz renouvelable.

L'enjeu suivant est l'échelle à laquelle installer ces divers moyens pilotables. C'est ici que se situe le vrai débat sur « la place de l'électricité et du gaz dans le chauffage » que l'on peut reformuler ainsi : « quels sont et où sont les moyens de production de chaleur les plus

LES AUTEURS
BENJAMIN HAAS,
ENGIE LAB CRIGEN
ET MURES ZAREA,
ENGIE RESEARCH

appropriés lors de la pointe hivernale ? » La question est d'arbitrer entre des moyens électriques pilotables centralisés et des moyens plus décentralisés, plus proches des usagers et valorisant des cycles courts et circulaires (pompes à chaleur électriques dotées d'appoint au gaz renouvelable, stockage thermique du solaire thermique, récupération de la chaleur fatale...). Ce peut être à l'échelle des territoires avec des logiques de communautés énergétiques s'appuyant sur les réseaux en place, ou bien à celle des bâtiments avec des systèmes hybrides faisant appel à des appoints pilotables et décarbonés au niveau des bâtiments.

TROIS ÉCHELLES

Chacune de ces échelles (centralisée, territoire et bâtiment) offre des avantages et des inconvénients que l'on pourrait résumer ainsi : plus la production pilotable est à forte puissance (et donc centralisée), plus sa gestion est aisée techniquement, mais moins elle est performante énergétiquement du fait des pertes lors de la transformation d'une énergie en une autre. Arbitrer entre la part de chacune de ces échelles est complexe et, alors qu'il s'agit d'un problème brûlant d'actualité, il est essentiel de ne pas perdre de vue que parier sur un seul et unique avenir (souvent vu comme tout électrique) sans s'accorder une capacité de résilience et d'évolution, c'est prendre le risque d'échouer. Pour atteindre le zéro carbone, il est urgent de ne pas se fermer d'option, de travailler sur les trois échelles et de ne pas cacher des émissions de carbone dans la production électrique centralisée et enfin d'aller chercher la performance énergétique et l'efficacité économique. C'est ce sur quoi planchent les équipes d'ENGIE. Et d'espérer d'autres manchettes, du type « Une alliance pour un chauffage vertueux ». ■

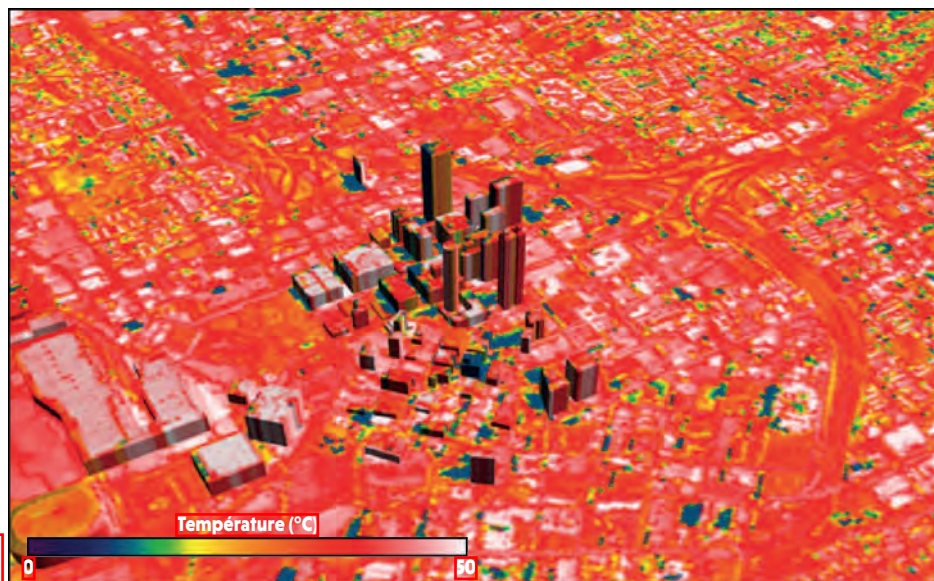
Un monde décarboné... et climatisé

Les défis à relever dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement en matière d'équipements frigorifiques de climatisation, afin de lutter efficacement contre le réchauffement climatique sont immenses. Mais pas insurmontables...

Aux États-Unis, la consommation d'énergie liée à l'air conditionné et à la climatisation serait supérieure à la consommation globale de... l'Afrique ! Et la tendance n'est pas à la baisse. De fait, les systèmes frigorifiques adaptés au traitement d'air des locaux résidentiels et tertiaires sont promis à un fort développement commercial. Cela tient principalement à la volonté d'améliorer le confort des occupants de ces locaux en période estivale, particulièrement lorsque les épisodes de chaleur s'accroissent. Que faire face à l'augmentation inéluctable de la demande de « froid » ?

Un grand nombre d'équipements (climatiseurs, pompes à chaleur réversibles, groupes refroidisseurs d'eau...) sont disponibles, mais l'offre commerciale regroupe quasi exclusivement des machines électriques à compression mécanique et quelques produits fonctionnant au gaz. Certains de ces équipements ont de bonnes performances énergétique et environnementale grâce, d'une part, à l'utilisation systématique d'énergie renouvelable associée parfois à un dispositif de récupération de chaleur, et, d'autre part, à l'emploi de fluides frigorigènes naturels ou à faible potentiel de réchauffement planétaire, comme le dioxyde de carbone, l'ammoniac, le propane, les hydrofluoro-oléfines...

Toutefois, nul doute que les fabricants de systèmes de climatisation vont poursuivre leurs efforts, notamment pour respecter les échéances réglementaires en matière d'émissions de gaz à effet de serre, par exemple l'amendement de Kigali prévoyant une baisse drastique de la production et consommation des fluides frigorigènes de type HFC (hydrofluorocarbure) beaucoup plus réchauffants que les gaz réfrigérants précités. Un autre objectif est l'amélioration,



Les îlots de chaleur (ici à Atlanta) se traduisent par des pics de température (en blanc) dans les endroits les plus urbanisés.

entre autres, des coefficients de performance saisonniers de ces équipements. En complément de ces mesures, il est essentiel de réduire au maximum le besoin de « froid » en favorisant les bâtiments bioclimatiques, nous y reviendrons.

LES DÉFIS À RELEVER

En matière de développement de produits, il est fondamental de faire preuve d'innovation en améliorant les performances globales des systèmes existants et en proposant de nouvelles fonctionnalités, voire des technologies de rupture. Elles concernent, entre autres, les systèmes thermodynamiques utilisant la vaporisation de fluides frigorigènes (systèmes à compression mécanique ou thermique, à éjection, à sorption, thermochimiques...), des gaz actifs ayant de bonnes capacités à transférer de la chaleur, l'évaporation de l'eau, ainsi que les systèmes à effet « thermoacoustique » (des ondes sonores extraient la chaleur d'un environnement à refroidir) et « thermoélectrique ».

La plupart de ces technologies sont adaptées aux différentes typologies de bâtiments grâce à leur large plage de puissance, à leur mode d'utilisation (individuel ou collectif) et à leur intégration possible à des réseaux de chaleur. À titre d'exemple, les systèmes « thermofrigorifiques », produisant simultanément du chaud et du froid, intégrés aux réseaux de chaleur, sont probablement promis à un bel avenir s'ils sont en mesure de

recupérer une part importante de la quantité d'énergie inéluctablement perdue lors de la production de froid. C'est d'autant plus important que ces pertes contribuent à la création d'îlots de chaleur dans les zones urbaines (*voir la figure page ci-contre*).

Il est important de souligner que les conditions de mise en œuvre de ces systèmes sont essentielles pour obtenir les résultats escomptés : importance du stockage, de la gestion fine des niveaux de production et de consommation, ainsi que des outils de communication, par exemple dans les « smart grid ».

Autre défi, favoriser l'utilisation de sources d'énergie propre aux dépens des énergies traditionnelles (fossiles et nucléaire). Parmi les sources d'énergie susceptibles d'être valorisées par les systèmes frigorifiques liés au bâtiment, citons les ressources aquifères, le solaire car en phase avec le besoin de climatisation, la biomasse, l'hydrogène... La politique énergétique du Danemark est un exemple de cette transition puisqu'elle vise une autonomie énergétique « renouvelable » d'ici à 2050. C'est aussi le cas de Helsinki, en Finlande (*voir la figure ci-dessous*).

Le développement de l'infrastructure « cloud » et celui de la gestion intelligente des équipements de climatisation sont aussi des axes de recherche incontournables. L'architecture décentralisée sera vraisemblablement utilisée massivement par les entreprises en charge de l'exploitation et de la maintenance de ces équipements afin de traiter puis d'analyser les données de fonctionnement. Le croisement de ces informations, avec d'autres de nature technique ou administrative, aidera à améliorer la qualité des services proposés.

LES AUTEURS
RODOLPHE DESBOIS ET
CRISTIAN MURESAN, ENGIE

La ville de Helsinki organise ses réseaux de chaleur et de refroidissement de façon à atteindre la neutralité carbone en 2050.

La raison d'être d'un bâtiment est la création d'un « intérieur », d'une ambiance maîtrisée. En gérant les rapports entre cet intérieur et le climat extérieur, l'enveloppe du bâtiment et le système de traitement d'air ont un rôle primordial en matière d'efficacité énergétique. La règle actuelle consiste fondamentalement à isoler l'intérieur du bâtiment de son environnement proche. Pourtant, le sol, l'air, le soleil, le ciel, le vent, offrent des sources potentielles d'énergie, en hiver comme en été. Peut-on exploiter ces éventuelles sources d'énergie en les faisant pénétrer dans les bâtiments ?

LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

C'est le sens de la conception bioclimatique destinée à réduire les besoins de chauffage et surtout de refroidissement. Des bâtiments résidentiels et tertiaires pourraient réduire drastiquement le recours aux équipements de refroidissement en récupérant des frigories (qui sont au froid ce que les calories sont au chaud) disponibles dans l'environnement.

Parmi les solutions bioclimatiques les plus prometteuses, les équipes d'ENGIE Research en explorent de nombreuses. Ainsi, des revêtements avec des propriétés radiatives sélectives contrôlent les apports solaires ou bien augmentent les déperditions du bâtiment et des équipements associés par rayonnement sur des bandes de fréquences bien définies, et diminuent alors la température intérieure (on parle de « skycooling »).

On peut augmenter l'inertie thermique des bâtiments en intégrant des matériaux à changement de phase dans leur enveloppe et donc utiliser pendant la journée les frigories accumulées pendant la nuit.

Les solutions de « freecooling / géocooling » exploitent quant à elles les différents gisements de froid à disposition comme les eaux profondes marines et lacustres, les courants d'air froids, la neige en montagne, les nuits ou journées fraîches, les eaux souterraines.

Le secteur du bâtiment semble aujourd'hui suffisamment bien structuré pour répondre au défi de la transition énergétique. Concernant le froid, l'évolution technologique des méthodes de construction et de fabrication des systèmes frigorifiques se poursuit à grands pas même si le modèle économique associé peut se révéler « complexe » en fonction du cadre réglementaire du pays concerné. Au bout du compte, les États-Unis pourront peut-être rester toujours aussi frugivores sans pour autant réchauffer la planète. ■



Vers une agriculture neutre en émissions

© Shutterstock.com

Selon le département des affaires économiques et sociales de l'ONU, les villes en 2050 accueilleront plus de 66 % des 9 milliards d'habitants contre 43 % aujourd'hui. C'est près de 3 milliards de citoyens de plus qu'en 2020. Cet accroissement démographique en milieu urbain imposera de produire plus de nourriture au plus près des villes, et ce avec une énergie toujours plus propre. Or la consommation énergétique du secteur agroalimentaire représente déjà plus de 30 % de la consommation globale d'énergie primaire et plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre.

Offrir une nourriture et une eau de bonne qualité et en quantité suffisante est un défi qui nous concerne tous : producteurs, transformateurs, transporteurs, distributeurs comme consommateurs. Sur notre Terre l'usage du sol, la biodiversité et les ressources souffrent déjà du dérèglement climatique. Ici, les périodes de sécheresse s'allongent et s'intensifient. Là, des gelées tardives ponctuent un printemps de plus en plus précoce. Dans ces conditions, comment produire plus et mieux en respectant les limites de la planète et en réduisant la compétition entre agriculture et production d'énergie, par exemple

LES AUTRICES
ELODIE LE CADRE LORET ET
BÉRENGÈRE GENOUVILLE,
ENGIE RESEARCH

à partir de panneaux solaires pouvant occuper de grandes surfaces ? ENGIE s'intéresse de près à ces problématiques. Pourquoi ?

Parce qu'il accompagne les consommateurs d'énergie au quotidien pour leur fournir une énergie plus verte et plus efficace au sein des villes et des territoires. Et justement, les agriculteurs et le secteur de l'agroalimentaire ont besoin d'énergie pour les véhicules agricoles, de chaleur pour sécher les récoltes avant le stockage, de froid pour conserver les produits bruts ou transformés, d'électricité pour irriguer, de matière organique pour la production de biogaz... ENGIE peut donc naturellement proposer des solutions intégrées pour fournir une énergie plus verte, améliorer l'efficacité énergétique de toute la chaîne de production d'aliments et même celle de fertilisants plus verts.

Néanmoins, chaque territoire ayant ses particularités, les technologies sont à adapter aux différents secteurs agricoles, aux différentes zones géographiques et aux différentes parties de la chaîne agroalimentaire. Pour répondre à cette diversité des situations, nous élaborons des projets sur le terrain en partenariats avec les agriculteurs et les agronomes pour répondre au plus près à leurs besoins.



Les secteurs de l'agriculture et de l'agroalimentaire, appelés à croître en raison de la démographie, ne pourront diminuer leur empreinte carbone qu'au prix de plusieurs changements d'habitudes de production. Les solutions existent.

L'électricité d'origine renouvelable peut aider à rendre plus verte l'agriculture.

Quelques exemples de projets pilotes montrent que l'on peut notablement diminuer l'impact carbone de notre alimentation. Ils répondent à trois questions. Quelles sont les technologies les plus prometteuses ? En quoi notre alimentation en sera-t-elle changée ? Polluerons-nous moins en mangeant des produits fabriqués à partir d'énergie locale ?

ENTRE CHAMP ET SERRE

Le premier projet porte sur la compétition entre différents usages de la terre. Il vise à produire plus de nourriture et d'énergie solaire sur une même surface en étudiant la meilleure combinaison de technologies de panneaux photovoltaïques et de cultures vivrières qui nécessitent de l'ombre pour favoriser leur croissance et ce dans plusieurs types de climat.

Le second pilote a pour objectif la réduction des émissions des cultures sous serres qui concernent en France une superficie d'environ 10 000 hectares, dont les deux tiers sont affectés aux cultures légumières. Il s'agit d'améliorer l'efficacité énergétique jusqu'à atteindre la neutralité carbone de ce type de cultures, sachant qu'aujourd'hui, elles consomment selon l'Ademe de 270 à 330 kilowattheures par mètre carré

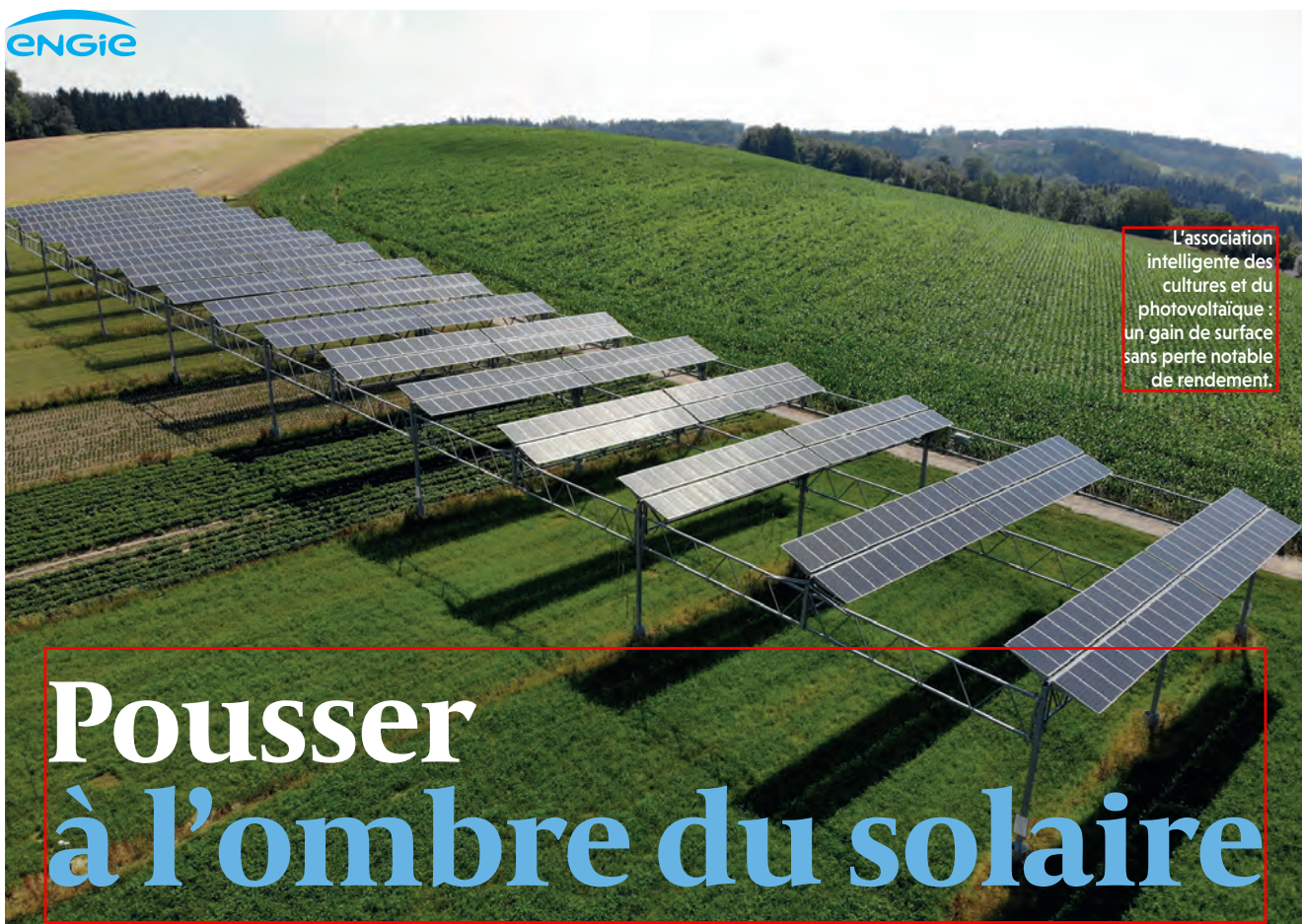
selon les régions. Cette énergie représente en moyenne 22 % des charges de production directes des exploitations de cultures sous serres chauffées. Pour ce projet, un partenariat a été monté avec l'université Wageningen, aux Pays-Bas, pour concevoir une serre autonome, notamment en énergie. Une serre test est équipée en capteurs d'eau, d'humidité du sol, de lumière, d'oxygène, de CO₂,... afin d'optimiser la culture sous contrainte de niveau d'émission de CO₂ et de consommation énergétique.

VERS L'HYDROGÈNE VERT

Le troisième axe concerne la production d'engrais verts. Une culture a besoin d'eau et de CO₂, mais aussi de nutriments comme l'azote, le phosphore et le potassium. L'azote est apporté par divers composés synthétiques élaborés à partir d'ammoniac aujourd'hui synthétisé *via* le procédé Haber Bosch : l'hydrogénation d'azote atmosphérique gazeux par de l'hydrogène gazeux avec un catalyseur. L'hydrogène est le plus souvent produit à partir d'hydrocarbures. ENGIE développe de nouveaux procédés de production d'hydrogène vert sur la base de l'électrolyse de l'eau avec de l'électricité verte excédentaire. Ce procédé, qui serait utile pour concevoir des engrais verts, est aujourd'hui centralisé dans des usines de très grandes capacités. Un des enjeux est d'étudier l'intérêt technico-économique de délocaliser cette production au plus près de sa consommation. De la sorte, non seulement nous baisserions la pollution des sols, mais aussi celle de l'air en diminuant le transport des fertilisants. Ces solutions, déployées seules ou combinées, n'influenceront pas sur la qualité des produits consommés, mais diminueront leur empreinte carbone.

Ces initiatives ne sont pas isolées. Elles complètent un panel de solutions high-tech (agriculture de précision, agriculture urbaine...) et low-tech (le non-labour par exemple). Elles se développeront en parallèle à travers les villes du monde entier selon la taille des exploitations et la capacité des producteurs à adopter ces nouvelles technologies. À moyen terme, les changements technologiques les plus abordables et les plus matures, comme l'utilisation de nouveaux capteurs pour optimiser la production et les procédés, vont largement se généraliser. En parallèle, les consommateurs devront s'organiser et faire pression pour diminuer les émissions liées au transport des aliments, le gaspillage alimentaire et améliorer le traçage des produits.

Selon le dernier panorama des technologies émergentes du cabinet DNV GL, les citoyens tendront vers un partage des ressources locales sous forme de coopératives alimentaires basées sur des productions plus locales à faible impact carbone. C'est ainsi qu'une empreinte carbone totale minimale sera envisageable, de la fourche à la fourchette. ■



L'association intelligente des cultures et du photovoltaïque : un gain de surface sans perte notable de rendement.

Pousser à l'ombre du solaire

© Fraunhofer ISE

Que ce soit sous les climats tempérés ou dans des régions plus arides, les cultures combinées aux panneaux solaires sur une même surface forment un duo gagnant.

Dans le monde entier, le photovoltaïque est devenu un élément clé de la transition énergétique. Pourtant, certains pays fortement urbanisés, tels la Belgique ou les Pays-Bas, manquent d'espace pour installer de grandes centrales solaires. Dans ce contexte, ne serait-il pas logique d'utiliser le sol de manière plus judicieuse ?

Une solution serait de combiner intelligemment l'activité agricole et la production d'électricité solaire sur une même parcelle : on parle alors d'agrivoltaïque (contraction d'agriculture et de photovoltaïque). C'est le pari d'ENGIE Bénélux, dont les équipes mettent en œuvre un projet de ce type à grande échelle, aux Pays-Bas. Il s'agit d'installer d'ici 2021 une centrale photovoltaïque d'une puissance de 45 mégawatts, cohabitant avec des cultures agricoles.

CÉLERI OU FRAMBOISES ?

La première étape consiste en un champ d'essai d'un hectare où différentes options seront testées, afin d'engranger une expérience indispensable au déploiement du démonstrateur en entier sur 50 hectares. Quelles cultures

LES AUTEURS

JÖRAN BEEKERK VAN RUTH
ET STIJN SCHEERLINCK,
LABORELEC,
ROB KURSTEN,
ENGIE BENELUX,
CLAIRE DU COLOMBIER,
ENGIE SOLAR

mettre en place, valorisables mais supportant l'ombrage ? Céleri ? Framboises ? Quelle technologie solaire choisir ? Classique ou bifaciale ? Quelle configuration adopter ? Quelle est la densité optimale de panneaux photovoltaïques à installer, afin de produire assez d'électricité sans trop assombrir le champ sous-jacent ? Pour y répondre, ENGIE coopère avec un partenaire local, Green Meteor, spécialisé à la base dans la construction de structures de protection des cultures contre la grêle ou le soleil. Cette association présente également l'avantage de créer des liens avec le secteur horticole, indispensable à la bonne conduite du projet.

Les rendements sont-ils affectés ? Les conclusions du projet APV-RESOLA mené par

L'AGRIVOLTAÏQUE, UNE HISTOIRE MONDIALE

L'agrivoltaïque associant photovoltaïque et agriculture sur une même surface a été proposé en 1981 par Adolf Goetzberger et Armin Zastrow. Au Japon, il s'est développé à partir de 2004 sous l'impulsion d'Akira Nagashima. De nombreux types de cultures en profitent, comme les agrumes, les concombres, le riz, les vignes... La technique a ensuite essaimé dans diverses régions du monde : Chine, Inde, Malaisie, Autriche, Chili... Au Vietnam, dans le delta du Mékong, l'institut Fraunhofer ISE a déployé un système agrivoltaïque pilote dans une ferme de crevettes en 2017.

l'institut allemand Fraunhofer ISE en 2018 montrent que les systèmes agrivoltaiques peuvent atteindre une production agricole satisfaisante. En effet, certaines cultures tolèrent assez bien l'ombre et peuvent s'accommoder d'une réduction du rayonnement photosynthétiquement actif (le PAR : lumière utile aux végétaux entre 400 et 700 nanomètres de longueur d'onde), sans perte importante de rendement. Les effets dépendent également du niveau d'ombrage fourni par les panneaux solaires.

Dans le projet APV-RESOLA, une parcelle expérimentale où poussaient des pommes de terre (voir la figure page ci-contre) a été partiellement couverte de panneaux photovoltaïques, entraînant une diminution annuelle de 30 % de l'irradiation solaire. Verdict : le rendement en pommes de terre a augmenté de 3 % ! Le résultat s'exprime globalement par un ratio d'équivalence du sol (*land equivalent ratio*) : il est ici de 186 %, c'est-à-dire 103 % d'efficacité relative des pommes de terre et 83 % d'efficacité relative de la production photovoltaïque.

Si les pommes de terre semblent profiter de l'ombre, ce n'est pas le cas de toutes les plantes. Dans les mêmes conditions, la production de trèfle a diminué de 8 %... Le choix du type de culture est donc primordial !

FAVORISER LA BIODIVERSITÉ

Les synergies entre agriculture et photovoltaïque vont bien au-delà des cultures et du rendement énergétique. Les sites solaires peuvent être bénéfiques pour la biodiversité locale, tout en créant un habitat indispensable aux espèces pollinisatrices. Ainsi, aux États-Unis, ENGIE NORAM plante de la végétation locale sur ses sites solaires et s'associe à différents acteurs (le Laboratoire américain des énergies renouvelables (NREL) dans le Colorado, le Bee Lab de l'université du Minnesota...) afin de créer des habitats pour les pollinisateurs, dont les abeilles, et de favoriser la biodiversité à l'échelle nationale. Un exemple en particulier est le projet InSPIRE du NREL, qui tente de quantifier les bénéfices des plantations locales d'un point de vue environnemental, mais aussi économique.

Autre exemple : pour un projet en cours de développement à Hawaï, ENGIE s'est allié à Agicon LLC afin d'identifier des synergies possibles entre photovoltaïque et agriculture. Une recommandation a été d'intégrer au projet solaire une plante native coupe-vent, le seringat.

En France, ENGIE Green a également développé cinq projets solaires comportant des ruches et des plantes à fleurs, soutenant ainsi la biodiversité.

L'agrivoltaïque peut-il être utile ailleurs que dans les régions tempérées ? Pour y répondre, rejoignons le désert d'Atacama, au Chili. Pour ce qui est de l'ensoleillement et de la chaleur, on peut difficilement faire mieux ! Les niveaux



© ENGIE Labore & C. Andestino

Dans la région d'Arica (ici, la vallée de Ljulia), au Chili, ENGIE envisage le développement d'un projet agrivoltaïque.

élevés d'irradiation sont une bonne nouvelle pour la production photovoltaïque, même si les températures excessives et la poussière peuvent nuire aux performances. Cependant, la chaleur et la sécheresse n'offrent pas toujours de bonnes conditions à la croissance des cultures.

POUSSER DANS LE DÉSERT

C'est là qu'intervient l'agrivoltaïque : à la faveur de l'ombre prodiguée par les structures solaires, les cultures pourraient prospérer dans des conditions microclimatiques favorables (humidité du sol plus élevée et températures ambiantes plus basses) et, s'il existe une source d'eau disponible, être irriguées à l'aide de l'électricité verte produite sur place. Encore mieux : sous ces climats, les cultures auraient tendance à atténuer la température sous les panneaux photovoltaïques, améliorant les performances de ces derniers.

En fin de compte, grâce à l'agrivoltaïque, les communautés locales bénéficieraient d'une activité économique inédite. Par rapport aux installations des régions tempérées, le gain potentiel du rendement global (solaire et agriculture) est plus important, principalement en raison de l'augmentation significative du rendement des cultures. ENGIE envisage le développement d'un projet pilote en collaboration avec les agriculteurs de la région d'Arica, dans le désert d'Atacama, l'une des villes les plus arides au monde.

Où que ce soit, l'intrication des cultures et du photovoltaïque ouvre la voie vers une agriculture encore plus intelligente et résiliente. Cette combinaison se doit d'être étudiée à un stade précoce de chaque projet, afin de bénéficier des meilleures expertises et ainsi d'optimiser les solutions agricoles et énergétiques. Preuve de l'intérêt porté à l'agrivoltaïque, la première conférence internationale dédiée à ce sujet aura lieu en août 2020, à Perpignan, à l'initiative de l'INRA et de l'institut Fraunhofer ISE. ■

RÉFÉRENCES

Agrophotovoltaics : High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018, institut Fraunhofer ISE, 2019.

H. Marrou, Co-locating food and energy, *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 793-794, 2019.

G. Barron-Gafford et al., Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands, *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 848-855, 2019.

R. Davis, Solar and pollinators : A photo essay, *PV Magazine*, 2019.

ADELINE DUTERQUE,
Directrice de l'ENGIE LAB CRIGEN



LUC GOOSSENS,
Directeur de la technologie, ENGIE



JAN MERTENS,
Directeur scientifique d'ENGIE

Transition énergétique : l'indispensable complémentarité

Lorsque l'on parle de transition énergétique, on a souvent tendance à opposer les solutions. Chez ENGIE, nous cherchons plutôt à les mettre en synergie.

Fin 2019, deux experts en énergie déjeunaient ensemble et discutaient : l'un est une référence internationale en matière de pompes à chaleur et l'autre une sommité dans le domaine de la combustion de la biomasse. Il est frappant de constater à quel point même des personnes très intelligentes tombent dans le piège du « noir ou blanc ». Le spécialiste en pompes à chaleur affirmait qu'il était « évident » que l'avenir du chauffage domestique serait entièrement électrique et que les pompes à chaleur étaient la meilleure (et la seule) solution. L'autre habitait dans une maison rénovée dont l'isolation n'était pas aux normes actuelles, ce qui imposait un système de chauffage à haute température ; il soutenait qu'une pompe à chaleur ne serait pas efficace dans ce type de logement. Et d'ajouter que les nouvelles chaudières à biomasse utilisant une combustion à deux, voire à trois phases et équipées d'un système intégré de traitement des fumées, seraient très bien adaptées au chauffage domestique, même dans les zones densément peuplées, car leurs émissions étaient négligeables.

Le plus intéressant dans une discussion sur l'énergie est qu'il n'est pas nécessaire d'être un expert pour avoir une opinion tranchée. Ça tient évidemment au fait que l'énergie est omniprésente dans notre quotidien et au rôle essentiel qu'elle joue dans le monde aujourd'hui. Selon Michael Webber, elle est le gage d'une vie de qualité et, bien utilisée, elle offre aux humains santé, richesse et liberté. C'est grâce à elle que nous

avons accès à l'eau potable et à une nourriture saine. Dans beaucoup de ces discussions sur l'énergie, très divertissantes par ailleurs, la plupart des interlocuteurs semblent réfléchir de façon binaire à des solutions opposées : réacteurs nucléaires ou turbines à gaz pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables électriques, électricité ou gaz pour produire de la chaleur, batteries lithium-ion ou batteries redox à flux pour équilibrer le réseau de distribution, mobilité électrique ou hydrogène, biogaz ou gaz de synthèse... Après avoir lu les articles de ce cahier, vous aurez compris que chez ENGIE, nous ne raisonnons pas en ces termes. Nous n'opposons pas les technologies, nous réfléchissons plutôt à la façon dont elles peuvent se compléter.

QUELLES SOLUTIONS POUR LE TRANSPORT ?

L'un des débats les plus courants est de savoir si l'avenir de la mobilité sera électrique ou hydrogène, à base de biogaz ou d'hydrocarbures de synthèse. Cette façon de poser la question suppose de faire un choix, alors qu'il serait plus juste de se demander où chaque solution de mobilité sera la plus pertinente. Ainsi, pour les courts déplacements et les véhicules légers, la voiture électrique à batterie possède une telle longueur d'avance qu'il sera difficile pour les autres technologies de rattraper leur retard. Cependant, pour les transports plus lourds (bus, camion, transport maritime...), on aura très probablement un mix énergétique

diversifié, la part respective des différents carburants restant difficile à prévoir.

L'installation d'un réseau étendu de distribution d'hydrogène-carburant semble peu probable dans un avenir proche, mais pour les trajets où les véhicules font la navette entre des lieux où il est produit localement, l'hydrogène représente une bonne alternative. De même pour la partie du réseau ferré qui n'est pas encore électrifiée : les trains à hydrogène sont une option intéressante lorsque l'on cherche des solutions pour décarboner ce mode de transport. Pour l'aviation, les chercheurs travaillent au développement de solutions électriques ou à hydrogène, mais il est peu probable que celles-ci remplaceront le kérosène pour les vols long-courrier dans l'immédiat. La raison en est simple : la faible densité énergétique (la quantité d'énergie pour un volume ou une masse donnée) des batteries actuelles et de l'hydrogène. Mais là encore, des solutions à base d'électricité et d'hydrogène pourraient voir le jour pour de petits avions et les vols court courrier, ou pour les avions à propulsion hybride, qui utiliseront l'électricité ou l'hydrogène pour le roulage au sol et un hydrocarbure de synthèse neutre en carbone pour voler. L'accès à des carburants synthétiques est vital pour l'avenir des vols long-courrier.

Un autre débat aussi intéressant qu'animé concerne le transport de l'énergie sur de longues distances. En effet, tout le monde ne vit pas dans une zone où les énergies renouvelables bon marché sont abondantes. Dans notre transition vers un monde sans carbone, cette question se pose avec plus d'acuité. Les

“ Dans une discussion sur l'énergie, il n'est pas nécessaire d'être un expert pour avoir une opinion tranchée ! ”

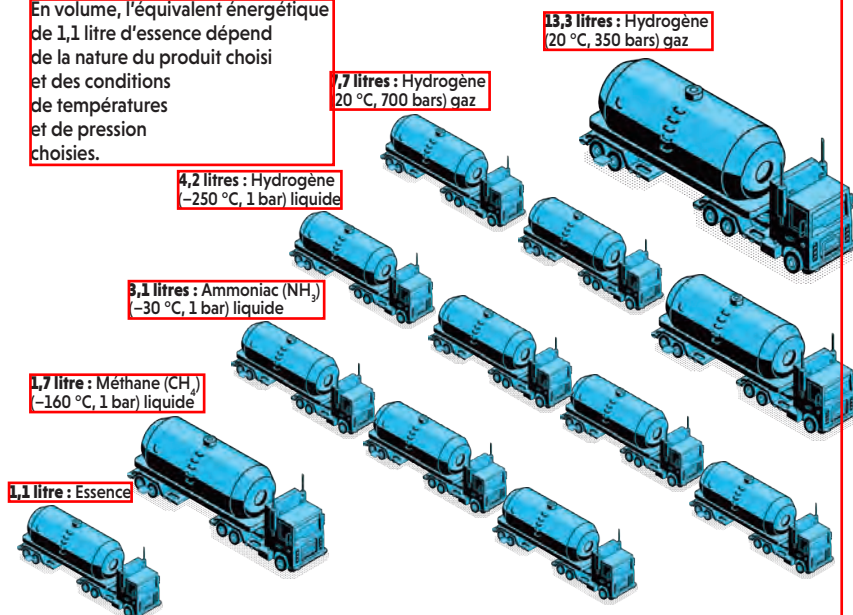
lignes à courant continu haute tension feront partie de la solution, mais à mesure que la distance augmentera, d'autres moyens de transport entreront en jeu. Ces derniers impliqueront la conversion de l'électricité en d'autres vecteurs énergétiques, comme l'hydrogène, l'ammoniac ou les hydrocarbures de synthèse. Aujourd'hui des solutions encore plus innovantes émergent, par exemple les liquides organiques porteurs d'hydrogène ou les « *metal fuels* ». Encore une fois, toutes ces technologies contribueront sans doute ensemble à transporter l'énergie, cette question du transport de l'énergie sur de longues distances est donc une priorité pour la recherche chez ENGIE.

GAZ ET ÉLECTRICITÉ À TOUS LES ÉTAGES

Un autre débat intéressant dominé par la question du « ou exclusif » est de savoir, dans le cadre d'une transition vers un monde neutre en carbone, si nous devrions miser sur l'électrification de l'industrie ou plutôt sur l'utilisation de gaz verts. Là encore, et ce cahier le montre, chez ENGIE, nous pensons que la bonne stratégie est de faire les deux simultanément. L'électricité offre des avantages importants par rapport au gaz. Qui plus est, la transformation de l'électricité en gaz est moins efficace et plus coûteuse que l'inverse. Cependant, le gaz reste indispensable pour le stockage saisonnier de l'énergie ou pour augmenter la densité d'énergie avant de la transporter. L'utilisation de gaz verts permet de surcroît de profiter des infrastructures de transport existantes. En fait, lors de l'introduction de technologies telles que le « Power to Gas » (la transformation de l'énergie électrique en énergie chimique, par exemple en hydrogène, pour la stocker) et le « Power to Gas to Power », la distinction entre l'électricité et le gaz tend à s'effacer et la transformation dans les deux sens devient facile. Ainsi, la discussion sur la

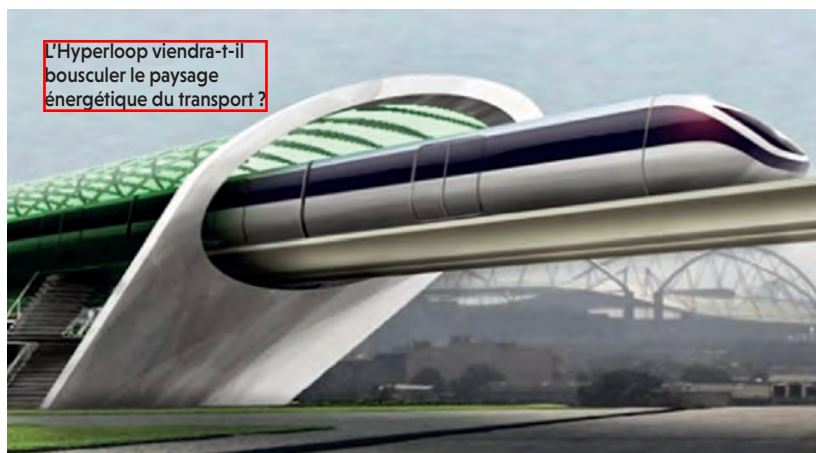
COMMENT TRANSPORTER 10 KILOWATTHEURES D'ÉNERGIE ?

En volume, l'équivalent énergétique de 1,1 litre d'essence dépend de la nature du produit choisi et des conditions de températures et de pression choisies.



L'Hyperloop viendra-t-il
bousculer le paysage
énergétique du transport ?

© Hyperloop



question du choix entre l'électricité et le gaz
n'a plus beaucoup de sens puisque nous tra-
vaillerons avec les deux !

LES SURPRISES DU FUTUR

L'éventuel impact sur la transition éner-
gétique de technologies en rupture reste dif-
ficile à prévoir. Assurément, certaines ne
manqueront pas d'apparaître dans les années
à venir et changeront la donne. La photosyn-
thèse artificielle, le remplacement de vols

court courrier pour le transport de personnes
ou de marchandises par des solutions de type
Hyperloop, ces trains ultrarapides circulant
dans des tubes à basse pression (voir la photo
ci-contre), l'énergie éolienne aérienne et la
transformation (biologique ou non) du CO_2
en carburant peuvent s'avérer d'une aide pré-
cieuse sur la voie de la neutralité carbone.

C'est pourquoi l'investissement dans la
recherche sur ces nouvelles technologies est
si important et la collaboration entre organi-
sations publiques et privées pour les dévelo-
pper, essentielle. ENGIE s'est engagé à travailler
avec ces partenaires pour codévelopper ces
technologies émergentes par le biais de projets
pilotes et de démonstrateurs. Outre les aspects
environnementaux et économiques des nou-
velles technologies, le soutien des citoyens
sera déterminant. L'acceptation sociale et le
rythme d'adoption des nouvelles technologies
détermineront la percée d'une innovation
donnée.

La transition énergétique se fera donc selon
deux axes, c'est une histoire de « et », plutôt que
de « ou ». Nous aurons besoin de toutes ces
technologies émergentes et soutenables, car
aucune ne pourra relever à elle seule le défi.
L'objectif est si ambitieux qu'il impose à tous,
particuliers, entreprises, secteurs d'activité, de
travailler ensemble. Alors rejoignez-nous dans
notre voyage vers un monde sans carbone. ■

La synergie des solutions,
pour une utilisation la plus
adaptée des énergies.

© ENGIE / N. RO / André Meyssonnier



POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



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

À 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				€

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 : _____

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 31/12/2020 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.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
 BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'ESSENTIEL

> Les corvidés, perroquets et autres oiseaux ont des aptitudes cognitives de haut niveau, comme le raisonnement, la flexibilité mentale, la planification, la cognition sociale et l'imagination.

> Or leur cerveau est minuscule et dénué de cortex, contrairement à celui des mammifères, qui est plus

gros et dont le cortex assure justement ces capacités cognitives complexes.

> La taille du cerveau des oiseaux est compensée par une grande densité de neurones et des signaux neuronaux qui circulent plus vite entre les réseaux cérébraux.

L'AUTEUR



ONUR GÜNTÜRKÜN
professeur
de biopsychologie
à l'université de la Ruhr,
à Bochum,
en Allemagne

Une corneille noire
(*Corvus corone*).
Comme d'autres corvidés,
cet oiseau a de bonnes
aptitudes cognitives.

L'étonnant cerveau des oiseaux

Ils savent se reconnaître dans un miroir, se servir
d'outils rudimentaires et même en fabriquer.
Ils n'ont pourtant qu'une... cervelle d'oiseau!
Paradoxe ?



Gertie est une pie bavarde (*Pica pica*), comme vous en avez déjà souvent croisé. Sauf que celle-ci nous a étonnés un jour de 2006, en se prêtant à l'une de nos expériences dans notre laboratoire de l'université de la Ruhr, à Bochum, en Allemagne. Mes collègues, Helmut Prior, Ariane Schwarz, et moi-même avons recouvert sa tête d'un linge afin de coller un bout de post-it jaune sur le plumage noir de sa gorge, sans qu'elle ne s'en rende compte. Puis, retirant le tissu, nous l'avons laissée seule face à un miroir et sommes allés l'observer sur un écran depuis une autre pièce. Qu'a fait l'oiseau alors ?

Se voyant dans le miroir, Gertie s'est tout de suite gratté vigoureusement la gorge pour retirer le Post-it. Cette expérience dite « du miroir » est un test pour déterminer si un animal est capable de se reconnaître. Les enfants, à partir de l'âge de 18 mois, et les singes, entre autres, passent ce test haut la main, preuve qu'ils comprennent que l'image renvoyée par le miroir est la leur. Mais jamais encore on n'avait vu un oiseau réussir ce test. Gertie l'a fait. Et, une fois débarrassée du papier jaune, elle s'est détendue en se regardant dans le miroir...

Le succès de notre pie était-il le fait d'un heureux et excitant hasard ? Gertie n'a-t-elle pas simplement cherché à se débarrasser de quelque chose qui la grattait ? Pour en avoir le cœur net, nous avons à nouveau testé Gertie dans des conditions identiques, mais, dans un premier cas, l'autocollant était noir et à peine visible sur ses plumes, et dans un second, il était toujours jaune sans miroir face à l'oiseau. Dans aucun des deux cas, notre pie n'a cherché à retirer l'autocollant. Parce qu'elle ne le voyait pas sur son propre plumage. Et comme d'autres pies se sont comportées de cette façon dans les mêmes circonstances, nous en avons conclu que ces oiseaux comprennent que, dans un miroir, c'est leur reflet qu'ils voient.

LA PIE A CONSCIENCE D'ELLE-MÊME

À cette époque, seuls les humains et quelques mammifères dotés d'un gros cerveau – chimpanzés, orangs-outans, éléphants indiens et grands dauphins – avaient réussi l'expérience du miroir, laquelle met en évidence une aptitude cognitive complexe : la conscience de soi, ou la capacité d'introspection qui permet de se reconnaître en tant qu'individu distinct de l'environnement et de ses semblables. Ce résultat ébranlait l'idée dominante depuis plus d'un siècle selon laquelle de telles capacités nécessitent un gros cortex, c'est-à-dire une couche cérébrale externe épaisse. Selon cette théorie, les oiseaux étant

dépourvus de cortex, ils ne pouvaient pas se reconnaître dans un miroir ni réussir d'autres tests cognitifs complexes.

Or depuis quelques années, l'étude de leur cognition prouve exactement le contraire : au fil de centaines de millions d'années, l'évolution a permis le développement de facultés cognitives communes aux humains et aux oiseaux, même si leurs structures cérébrales sont très différentes. Avoir conscience de soi, apprendre des choses complexes et prendre des décisions font aussi partie de l'arsenal cognitif des corvidés et des perroquets.

Alors, pourquoi les biologistes croyaient-ils les oiseaux incapables de telles compétences ? Il faut remonter à Ludwig Edinger (1855-1918), à la fin du XIX^e siècle, pour le comprendre. Ce neuroanatomiste de l'université Goethe, à Francfort, a consacré sa carrière à déterminer l'évolution du cerveau et de la cognition des vertébrés. Il pensait que l'évolution progresse pas à pas depuis des formes primitives vers des formes complexes, de sorte qu'à partir des poissons, elle aurait successivement produit les amphibiens, les reptiles, les oiseaux puis les mammifères. Il a ainsi mis en évidence que la plupart des composants de base du cerveau ont toujours existé chez les vertébrés.

POURQUOI CROYAIT-ON LES OISEAUX « BÊTES » ?

Toutefois, une partie du cerveau, la couche la plus externe, aurait subi des changements évolutifs plus importants que le reste, et serait la cause de l'augmentation des capacités cognitives. En effet, le cerveau primitif des vertébrés comporte deux parties principales : le pallium, plus externe, et le sous-pallium, plus interne (pallium signifiant en latin « manteau »). Chez les mammifères, le pallium comprend principalement le cortex à six couches, siège des aptitudes cognitives de haut niveau (comme le raisonnement et la planification), mais aussi des régions plus petites et plus centrales, telles



© Tim Flach

On pensait que seuls les humains et quelques mammifères à gros cerveau passaient le test du miroir



que l'hippocampe (impliqué dans la mémoire). Quant au sous-pallium des mammifères, il s'agit d'une masse homogène de neurones qui stocke des configurations de mouvements, puis les réactive.

Il en va tout autrement pour les oiseaux. Si vous regardez les dessins anatomiques établis par Edinger, vous aurez des difficultés à distinguer leur pallium de leur sous-pallium... En effet, Edinger a considéré qu'une grande partie du pallium était du sous-pallium, attribuant ainsi aux oiseaux un énorme sous-pallium et un tout petit pallium. D'où l'idée que leurs capacités cognitives seraient modestes...

Erreur! Mais comme Edinger était un scientifique de renom à l'époque et que sa théorie expliquait bien pourquoi les mammifères ont de meilleures aptitudes cognitives, ses idées erronées ont persisté pendant plus d'un siècle et influencé les neurosciences jusqu'à l'aube du xx^e siècle.

Autre raison expliquant la prétendue infériorité mentale des oiseaux: leur cerveau est minuscule comparé à celui des mammifères. Les autruches ont le plus gros, à savoir 26 grammes, à comparer aux 400 grammes du cerveau d'un chimpanzé, aux 1300 grammes de celui d'un humain et aux 9000 grammes de celui d'un cachalot... Et, pour les primates au moins, plus le cerveau est gros, plus les capacités cognitives sont élevées.

Une pie bavarde retire un autocollant de son plumage quand elle se voit dans un miroir: elle est capable de se reconnaître et a conscience d'elle-même en tant qu'individu distinct de l'environnement et des autres.

Dès lors, l'absence – apparente – d'un grand pallium cortical et la taille modeste du cerveau des oiseaux ont longtemps incité les scientifiques à croire qu'ils avaient des aptitudes cognitives limitées. Pourtant, Gertie a passé le test du miroir avec succès, ce dont sont incapables la plupart des mammifères ayant un plus gros cerveau qu'elle. Comment est-ce possible?

Ce sont les corbeaux de Nouvelle-Calédonie (*Corvus moneduloides*) qui ont aidé les chercheurs à répondre à cette question. Ces oiseaux vivent surtout des larves qu'ils extraient de crevasses dans l'écorce des arbres. En 1996, Gavin Hunt, de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande, a déjà constaté qu'ils fabriquent pour ce faire deux types d'outils. Et le processus de fabrication de ces derniers est si complexe que Hunt l'a comparé à celui des humains du Paléolithique moyen pour leurs outils lithiques (il y a entre 300 000 et 40 000 ans avant notre ère).

D'autres espèces animales utilisent des outils, mais quand on évalue correctement leurs comportements, on constate qu'ils reposent sur des réactions innées, préprogrammées dans leur génome, et non sur des traitements cognitifs de résolution de problèmes. Alors Alex H. Taylor, à l'université d'Auckland, et Russel Gray, de l'institut Max-Planck à Iéna, en Allemagne, ont tenté de mieux comprendre comment les corbeaux calédoniens manipulent les outils. Ils ont ainsi découvert que ces oiseaux sont capables de résoudre plusieurs problèmes en raisonnant: ils planifient leurs actions en se représentant mentalement des objets invisibles, et en déduisent des relations de cause à effet entre les événements observés.

Toutefois, ces corbeaux ne maîtrisent pas toute la physique de leurs actes! S'ils parviennent bien à déduire le poids d'un objet de la façon dont il se balance dans le vent, ils semblent parfois ne pas comprendre qu'un objet lourd ait plus d'impact sur la surface où il tombe qu'un plus léger.

Qu'en est-il de leur cognition sociale? Les corbeaux calédoniens savent travailler en équipe, mais ils ne comprendraient pas que leurs partenaires collaborent avec eux à une tâche, c'est-à-dire qu'ils représentent des «outils sociaux» facilitant l'accomplissement d'un objectif. En effet, ces oiseaux regardent les autres manipuler des objets, mais passent à côté des détails du comportement de leurs congénères qui permettent de suivre les séquences d'action pertinentes. Ainsi, ils visualisent le fonctionnement d'un outil, puis le reproduisent de mémoire, plutôt que d'apprendre directement des autres. Les corbeaux calédoniens ont donc une cognition physique développée, mais leur cognition sociale reste limitée. Est-ce spécifique à leur espèce?

POURQUOI LES OISEAUX SONT INTELLIGENTS

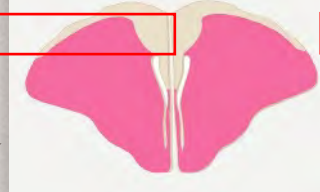
La taille minuscule du cerveau des oiseaux a d'abord fait croire aux neuroanatomistes que ces animaux ne pouvaient pas être intelligents. Mais les études scientifiques récentes ont fait perdre tout son sens à l'expression « *cerveau d'oiseau* ». En effet, l'évolution a produit chez les oiseaux une organisation neuronale différente de celle des mammifères, mais qui aboutit à des aptitudes cognitives très similaires.

● Pallium ● Sous-pallium ● Autres régions cérébrales

UNE VISION QUI A CHANGÉ

Jusqu'en 2004, on pensait que la partie antérieure du cerveau des oiseaux correspondait à un tout petit pallium, la partie du cerveau impliquée dans la cognition de haut niveau. Aujourd'hui, on sait que le pallium aviaire est en fait comparable, en proportion cérébrale, à celui du macaque.

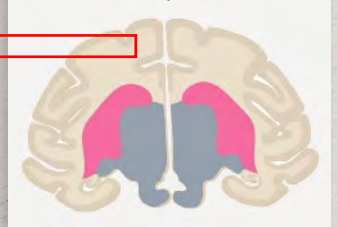
Cerveau de pigeon
(conception d'avant 2004)



Cerveau de pigeon
(conception d'aujourd'hui)



Cerveau de macaque



SYSTÈME SENSORIEL

- Centre visuel primaire
- Centre visuel secondaire
- Audition
- Somesthésie

SYSTÈMES LIMBIQUE ET MNÉSIQUE

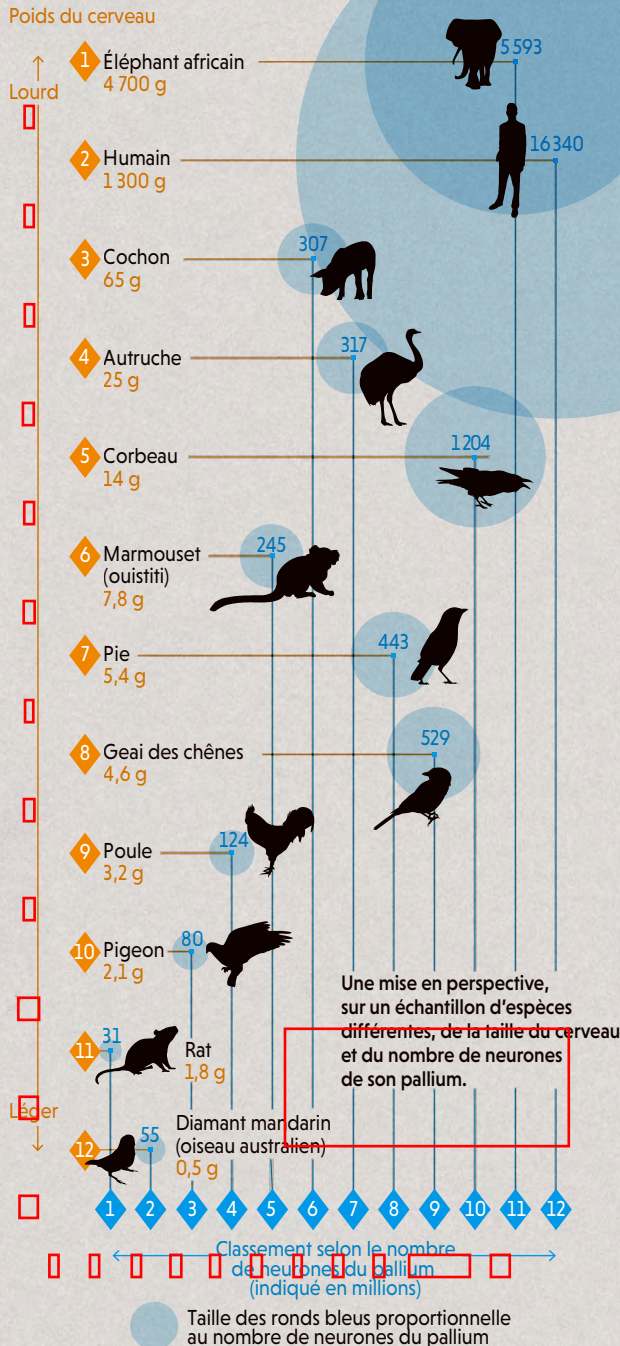
- Hippocampe
- Amygdale
- Cortex préfrontal / Nidopallium caudolatéral
- Aires motrices

FONCTIONS SIMILAIRES, EMPLACEMENTS DIFFÉRENTS

Le cerveau des oiseaux dispose de centres de traitement sensoriel et cognitif à peu près équivalents à ceux des primates. Toutefois, leurs emplacements diffèrent. Par exemple, le nidopallium caudolatéral, un important pôle d'intégration des systèmes sensoriels et moteurs des oiseaux, est situé à l'arrière de leur cerveau, alors que le cortex préfrontal des primates, aux fonctions semblables, est à l'avant.

LE CERVEAU DE DIFFÉRENTS ANIMAUX

Comment les oiseaux disposent-ils de telles aptitudes cognitives avec un aussi petit cerveau ? Il s'avère qu'ils ont plus de neurones que prévu, car leur cerveau est bien plus dense que celui des autres animaux. De plus, les signaux circulants entre des neurones proches ont moins de distance à parcourir et sont donc plus rapides. Cette vitesse de circulation de l'information neuronale compense le nombre réduit de neurones.



Plusieurs expériences ont été réalisées avec d'autres types de corbeaux, corneilles ou plus généralement de corvidés. Ainsi, des études ont montré que les jeunes n'ayant pas de partenaire sexuel ni de territoire forment des bandes temporaires qui se rassemblent près d'une source alimentaire, par exemple une carcasse. Quand certains grands prédateurs protègent une cachette de nourriture, les corbeaux font alors appel à des membres de leur bande pour faire diversion et ainsi avoir accès à leur pitance.

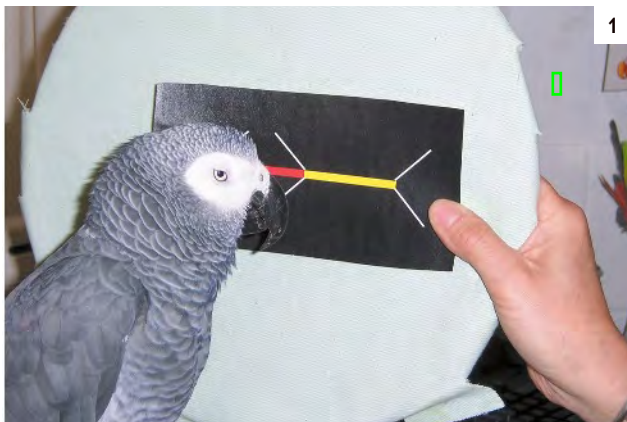
Autre observation : les couples ayant des petits savent défendre leur territoire contre les autres corbeaux. Ce qui provoque parfois des combats, que les corbeaux, en couple ou non, mais sans nichée à élever et disposant d'un grand réseau social ont beaucoup plus de chances de remporter. Voilà donc des stratégies sociales très développées, en grande partie mises en évidence par Thomas Bugnyar, de l'université de Vienne, en Autriche, Bernd Heinrich, de l'université du Vermont, aux États-Unis, et leurs collègues.

EN SITUATION DE DANGER, ILS APPELLENT À L'AIDE

Sur quoi repose une telle cognition sociale des corbeaux ? Un prérequis indispensable est, pour chacun d'eux, de connaître le réseau auquel appartient chaque oiseau et de savoir déterminer les intentions de tout individu rencontré. De fait, les corbeaux sont constamment attentifs aux indices révélant qu'une relation de domination a changé. Et ils utilisent leurs connaissances des réseaux sociaux lorsqu'ils sont attaqués par un corbeau dominant. Par exemple, ils tentent d'alerter les individus qui leur sont apparentés avec des cris de détresse quand ceux-ci sont à côté, mais restent silencieux lorsque le partenaire de l'agresseur est proche. De plus, comme le rang hiérarchique d'un individu augmente après un accouplement, les corbeaux surveillent les relations se formant entre leurs congénères, voire les perturbent de façon agressive... pour empêcher leurs concurrents de graver les échelons !

Autre capacité cognitive importante : une « théorie de l'esprit », dont font preuve les corbeaux lorsqu'ils emploient des stratégies sournoises pour empêcher d'autres oiseaux d'observer leurs réserves, ou lorsqu'ils regardent constamment leurs concurrents afin de piller leurs planques dès qu'ils en ont l'occasion. Ces oiseaux semblent donc comprendre ce que leurs congénères voient ou pas, et même évaluer les connaissances d'autrui ; ils sauraient donc se mettre à la place des autres. Et, si nécessaire, des corbeaux peuvent même tromper des pilliers potentiels de nourriture en les guidant vers un endroit vide, où ils font semblant d'avoir des réserves. Un peu comme s'ils savaient mentir.

Une bonne maîtrise de soi et une solide compréhension de quand il est adéquat de recourir à la force ou de fuir lors de leurs interactions avec autrui complètent ces aptitudes. Can Kabadayi et



1



2

> Mathias Osvath, de l'université de Lund, en Suède, ont montré que les corbeaux sont capables de planifier différents types d'événements futurs. Par exemple, ils choisissent un outil, comme un bâton, plutôt qu'une petite récompense immédiatement disponible, quand ils savent qu'avec l'outil, ils pourront obtenir une récompense plus importante le lendemain en troquant le bâton ou en l'utilisant pour dénicher plus de nourriture. En somme, les corbeaux disposent d'une cognition complexe avec un cerveau de seulement 14 grammes.

Un perroquet gris reconnaît les couleurs ❶. Un corbeau utilise un outil ❷. Un geai buissonnier teste sa mémoire épisodique ❸.

Les corbeaux ne sont pas les seuls oiseaux à l'esprit vif. Pendant vingt ans, Nicola Clayton, de l'université de Cambridge, a montré que les geais buissonniers (du genre *Aphelocoma*), des corvidés plus petits que les corbeaux et corneilles, sont tout aussi performants lors de tâches cognitives complexes. D'ailleurs, ce sont les premiers animaux non humains chez qui on a prouvé l'existence d'une mémoire épisodique, qui permet à un individu de se rappeler des événements de sa vie passée et d'imaginer le futur.

De même, les perroquets ne sont pas en reste! Souvenez-vous d'Alex, le fameux perroquet gris d'Irene Pepperberg, de l'université Harvard, une pionnière, avec Nicola Clayton, des études sur les corvidés et les perroquets. La chercheuse et ses collègues ont montré qu'Alex (pour *Avian learning experiment*, expériences d'apprentissage des oiseaux) était capable de catégoriser des objets, des actions et des quantités numériques (jusqu'à huit). De plus, les perroquets comprennent le concept de taille relative, discernent l'absence de quelque chose et détectent les similitudes et les différences entre objets. Alex peut même réaliser des additions très simples...

Face à ces études impressionnantes, les primatologues ont argué que les oiseaux ne seraient performants que dans certaines tâches cognitives, contrairement aux primates, bien plus habiles dans tous les domaines... Pour le vérifier, Thomas Bugnyar et moi avons analysé presque toutes les études scientifiques

portant sur huit aspects de la cognition complexe des primates non humains et des corvidés et perroquets. Résultat: les aptitudes cognitives de ces oiseaux et des singes sont très semblables.

Allons encore un peu plus loin: alors que les pies bavardes, les corbeaux ou corneilles, et les corbeaux calédoniens ont un cerveau d'environ 5,5, 8 et 14 grammes respectivement, celui des pigeons ne pèse que 2 grammes, comme le cerveau d'un rat. Mais les pigeons aussi sont plus intelligents qu'on ne le pense. À l'université de Bochum, Lorenzo von Fersen et Juan Delius ont montré que ces oiseaux sont capables de mémoriser 725 motifs abstraits et d'utiliser la logique d'inférence transitive, qui consiste, par exemple, à déduire que Jennifer est plus grande que Sarah quand on sait Jennifer plus grande que Sonia et celle-ci plus grande que Sarah.

DES PIGEONS QUI LISENT...

Récemment, avec Damian Scarf et Mike Colombo, de l'université d'Otago, en Nouvelle-Zélande, nous avons même trouvé que les pigeons peuvent apprendre à distinguer des mots anglais de quatre lettres de «faux mots», composés d'une voyelle et de trois consonnes combinées de diverses façons. Les oiseaux ont maîtrisé cette tâche puis ont transféré leurs connaissances acquises à de nouveaux ensembles de mots et de faux mots en utilisant des stratégies orthographiques semblables à celles pratiquées par des élèves de l'école primaire. Globalement, les pigeons sont aussi performants que les corvidés ou les perroquets dans diverses tâches cognitives, mais pas dans toutes... Et quand ils réussissent, il leur faut souvent plus de temps que ces derniers pour maîtriser la tâche et nettement plus d'entraînement pour saisir une règle abstraite.

D'où proviennent ces aptitudes cognitives complexes, certes plus ou moins développées selon les espèces, sachant que les oiseaux n'ont pas de cortex? Comment leur cerveau compense-t-il sa petite taille? Dès les années 1960, Harvey Karten, de l'université de Californie à



3

San Diego, a découvert que la plus grande partie du sous-pallium mis en évidence par Edinger correspond en fait à du pallium. Puis il a montré que les voies neuronales sensorielles et motrices reliant le pallium à d'autres régions du cerveau des oiseaux sont identiques à celles du cortex des mammifères. En 2002, une collaboration internationale de neuroscientifiques a examiné toutes les preuves accumulées et conclu que le pallium aviaire est en réalité plus grand qu'on ne le pensait, et même qu'il est relativement semblable à celui des mammifères.

En quoi? La similitude du pallium des oiseaux avec le cortex des mammifères est encore débattue. Certains chercheurs sont convaincus que la plus grande partie du pallium aviaire est identique à certaines couches corticales ou à certains de leurs neurones. D'autres pensent plutôt qu'elle est analogue aux autres aires du pallium des mammifères, par exemple à l'hippocampe. Peu importe finalement, car il convient de rappeler que des évolutions biologiques distinctes, mais convergentes, peuvent aboutir à des structures cérébrales dissemblables, remplissant toutefois des fonctions identiques.

DES RÉGIONS CÉRÉBRALES DISTINCTES AUX FONCTIONS IDENTIQUES?

Ce serait notamment le cas du cortex préfrontal des mammifères et du pallium des oiseaux. Au début des années 1980, Jesper Mogensen et Ivan Divac, de l'université de Copenhague, au Danemark, ont déjà remarqué qu'une région du pallium postérieur du pigeon ressemblait beaucoup au cortex préfrontal des mammifères. Voilà pourquoi j'ai entamé toute une série d'expériences (qui se poursuivent) pour montrer que cette aire du cerveau des oiseaux, nommée nidopallium caudolaterale, est, ➤



**RENDEZ-VOUS
AUTOUR DE L'EXPOSITION
PIERRES PRÉCIEUSES**

Jardin des Plantes
36 rue Geoffroy St Hilaire - Paris 5^e

Entrée libre et gratuite dans la limite des places disponibles

Détails sur jardindesplantesdeparis.fr

MUSEUM N° 510 - PARIS 5^e - 1920

**POUR LA
SCIENCE**

AUDITORIUM DE LA GRANDE GALERIE DE L'ÉVOLUTION

CINÉ-CLUB Samedi 4 avril 15h - Dès 6 ans

Voyage au centre de la Terre (1959, 132 min.), de Henry Levin

Le professeur Oliver Lindenbrook, convaincu que l'explorateur Arne Saknussemm, porté disparu, est parvenu au centre de la Terre, quitte Edimbourg avec ses camarades. Ils entreprennent un extraordinaire périple et sont poursuivis par le Comte Saknussemm qui souhaite bénéficier des retombées de la découverte de son ancêtre disparu.

RENCONTRE Lundi 20 avril 19h

Imaginaire des pierres - Histoires, croyances, symboles

Amulettes, pierres maléfiques, symboles précieux... Comment expliquer la fascination pour les pierres précieuses? Un rendez-vous à la croisée de l'histoire de l'art, de la littérature médiévale et de l'anthropologie.

Table-ronde animée par Marie-Odile Monchicourt, journaliste

Avec : Alain Epelboin, médecin-anthropologue, Muséum national d'Histoire naturelle.

Inezita Gay-Eckel, historienne de l'art, professeure à L'École des Arts Joailliers.

Valérie Gontero-Lauze, maître de conférences de langue et littérature du Moyen-Âge, Département de Lettres Modernes (CIELAM).

AMPHITHÉÂTRE VERNIQUET

COURS PUBLICS Jeudi 16 avril 19h

Jean-Baptiste Tavernier et les routes du diamant

Aventurier français, voyageur infatigable, marchand d'art et de pierres précieuses, Jean-Baptiste Tavernier est l'une des figures majeures du XVII^e siècle. Les fameux diamants issus des mines de Golconde en Inde feront sa gloire auprès du roi Louis XIV...

Avec : Cécile Lugand, enseignant-chercheur à L'École des Arts Joailliers et François Farges, minéralogiste au Muséum national d'Histoire naturelle et commissaire scientifique de l'exposition « Pierres précieuses ».



> comme la région préfrontale des mammifères, une zone de convergence des entrées sensorielles et des commandes sortantes du système moteur. De plus, comme le cortex préfrontal, le nidopallium caudolatéral joue un rôle critique dans toutes les tâches cognitives, et ses neurones codent des fonctions telles que la prise de décision et l'attribution de valeurs à diverses options avant qu'un choix ne soit fait.

Bien que le nidopallium caudolatéral et le cortex préfrontal des mammifères aient des fonctions semblables, les indices génétiques et leur emplacement (à l'arrière du pallium pour le premier et à l'avant du cerveau pour le second) suggèrent que ces deux régions ne proviennent pas d'un centre cérébral commun aux oiseaux et aux mammifères... Au contraire, autrefois, elles avaient probablement des fonctions très différentes chez les premiers ancêtres des mammifères et des oiseaux, puis elles auraient convergé en quelque 300 millions d'années pour devenir des régions dédiées à l'intégration cognitive des entrées sensorielles avec les sorties motrices.

J'ai souvent pensé à la célèbre phrase du docteur Ian Malcolm dans *Jurassic Park*: «La vie trouve un chemin.» Si deux groupes d'animaux distincts ont tous deux désespérément besoin d'une région cérébrale orchestrant des fonctions cognitives de haut niveau, ils développent indépendamment l'un de l'autre une région de type préfrontal.

Pour explorer comment une physiologie et une structure différentes finissent par fournir des fonctions cognitives identiques, Murray Shanahan, de l'Imperial College de Londres, moi-même et d'autres collègues avons examiné l'organisation du connectome, à savoir l'ensemble des connexions cérébrales, du pallium du pigeon. Nous avons ainsi montré qu'il est très similaire à celui des mammifères. D'où le message suivant: si deux groupes d'animaux développent des fonctions mentales semblables au cours de leur évolution, c'est qu'ils possèdent également les mêmes réseaux de connectivité cérébrale.

DAVANTAGE DE NEURONES AU MILLIMÈTRE CARRE

Mais une question reste en suspens: comment les oiseaux disposent-ils de telles aptitudes cognitives avec un cerveau si petit, et donc certainement peu de neurones et de connexions? Seweryn Olkowicz et Pavel Němec, de l'université Charles, à Prague, en République tchèque, et Suzana Herculano-Houzel, de l'université Vanderbilt, aux États-Unis, ont estimé le nombre de neurones de 28 espèces d'oiseaux. Surprise: leur cerveau, en particulier celui des corvidés et des perroquets, contient deux fois plus de neurones que sa taille le laissait supposer. Et comme ce surplus se trouve surtout dans

Alex le perroquet était capable de catégoriser des objets, des actions et des quantités numériques

le pallium, les corvidés et les perroquets disposeraient d'une plus grande puissance de calcul que certains singes au cerveau plus gros.

Mais même avec plus de neurones que prévu, les oiseaux en ont encore beaucoup moins que les mammifères, étant donné la toute petite taille de leur cerveau... Par exemple, les nestors kéas (des perroquets endémiques de Nouvelle-Zélande) disposent de 1,28 milliard de neurones palliaux, les corbeaux de 1,2 milliard, tandis que les chimpanzés en ont 7,4 milliards... pour des aptitudes cognitives, rappelons-le, presque semblables. En réalité, une plus grande densité de neurones engendre une diminution des distances de communication entre eux. Dans les tâches où l'information est transmise de façon répétée entre des groupes de neurones dans un cerveau dense, il en résulte un gain de temps, car les signaux passent plus rapidement d'un réseau à un autre. De fait, Sara Letzner et Christian Beste, de l'université technique de Dresde, en Allemagne, et moi avons montré que les pigeons réagissent parfois plus rapidement que les humains lors de certaines tâches cognitives.

Ainsi, indépendamment les uns des autres, les oiseaux et les mammifères se sont répandus à travers le monde en conquérant presque toutes les niches écologiques où des vertébrés peuvent vivre. Des capacités cognitives élevées ont été nécessaires pour trouver rapidement des solutions à des problèmes nouveaux et pour surpasser les concurrents. De sorte que la forte pression de sélection dans les deux classes de vertébrés a produit des aptitudes cognitives considérables et semblables. Certes, les oiseaux et les mammifères ont emprunté des chemins différents – les premiers ont «densifié» leurs neurones, les seconds ont augmenté la taille de leur cerveau –, mais ils ont développé des mécanismes neuronaux et des modes de pensée similaires. Pour une «cervelle d'oiseau» finalement plus proche qu'on ne le croyait de celle des grosses têtes. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Kabadayi et al., **Ravens parallel great apes in flexible planning for tool-use and bartering**, *Science*, vol. 357, pp. 202-204, 2017.

O. Güntürkün et T. Bugnyar, **Cognition without cortex**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 20, pp. 291-303, 2016.

D. Scarf et al., **Orthographic processing in pigeons (*Columba livia*)**, *PNAS*, vol. 113, pp. 11272-11276, 2016.

A. H. Taylor et al., **New caledonian crows reason about hidden causal agents**, *PNAS*, vol. 109, pp. 16389-16391, 2012.

J. Holzhaider et G. Hunt, **Rusé comme... un corbeau**, *Pour la Science*, n° 324, pp. 46-51, octobre 2004.

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. PLUS D'INFORMATIONS SUR
LE RECYCLAGE SUR
TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Les méfaits de la pollution lumineuse

Les endroits où l'obscurité de la nuit reste préservée se font de plus en plus rares. Or la lumière artificielle nocturne perturbe de plusieurs façons la vie des animaux... au point de contribuer à l'érosion générale de la biodiversité.

Dès que le jour faiblit, le micro-cébe murin, un petit lémurien nocturne de Madagascar, voit sa température corporelle augmenter de plusieurs degrés tandis que l'animal se met à rechercher activement de la nourriture. C'est un exemple parmi bien d'autres: les animaux et les plantes vivent au rythme de l'alternance du jour et de la nuit. Plus généralement, la lumière et la luminosité ambiante ont sur les espèces vivantes une grande influence. Nombre de processus physiologiques, de comportements, d'interactions au sein des écosystèmes dépendent de la lumière et de ses cycles journaliers ou saisonniers.

Quand on évoque les effets de la lumière naturelle sur le vivant, on pense le plus souvent à la lumière solaire. Cependant, la nuit, d'autres sources de lumière naturelle, à savoir la Lune et les étoiles, peuvent influencer les comportements. Tel est le cas avec les tortues marines venant d'éclore sur une plage la nuit. Ces nouveau-nés se servent de leur vision pour se diriger vers l'océan, l'horizon aquatique

renvoyant plus de lumière que la partie terrestre: c'est grâce à leur capacité à déceler la faible différence d'illumination entre les deux côtés de leur plage de naissance que les tortues marines s'orientent convenablement à ce moment crucial de leur vie!

Or depuis une centaine d'années, l'obscurité de la nuit est de plus en plus altérée par l'éclairage artificiel, qui se développe dans son intensité comme dans son étendue géographique. Cette généralisation de la lumière artificielle nocturne soulève une question centrale: dans quelle mesure perturbe-t-elle les organismes vivants, leurs populations et leurs interactions?

Les premiers signes préoccupants sont apparus il y a déjà longtemps. Par exemple, en Amérique du Nord, on a constaté dès les années 1920 une mortalité massive d'oiseaux à proximité des phares maritimes. Par ailleurs, les astronomes ont alerté dès les années 1970 sur l'expansion de la lumière artificielle nocturne, qui gêne leurs observations. Mais il a fallu attendre la dernière décennie pour que les scientifiques prennent la mesure du >

L'ESSENTIEL

> La nuit, la lumière d'origine artificielle est de plus en plus présente, même dans des régions éloignées des grandes agglomérations.

> Les impacts de cette pollution lumineuse sur la faune n'ont commencé à être étudiés que récemment.

> La lumière artificielle nocturne perturbe des

mécanismes hormonaux, les comportements des animaux, leurs interactions, leur orientation... Elle est probablement un facteur important de déclin de la biodiversité.

> Pour la limiter, plusieurs voies d'action sont possibles.

LES AUTEURS



EMMANUEL DESOUHANT
professeur à l'université Lyon-1, chercheur au Laboratoire de biométrie et biologie évolutive

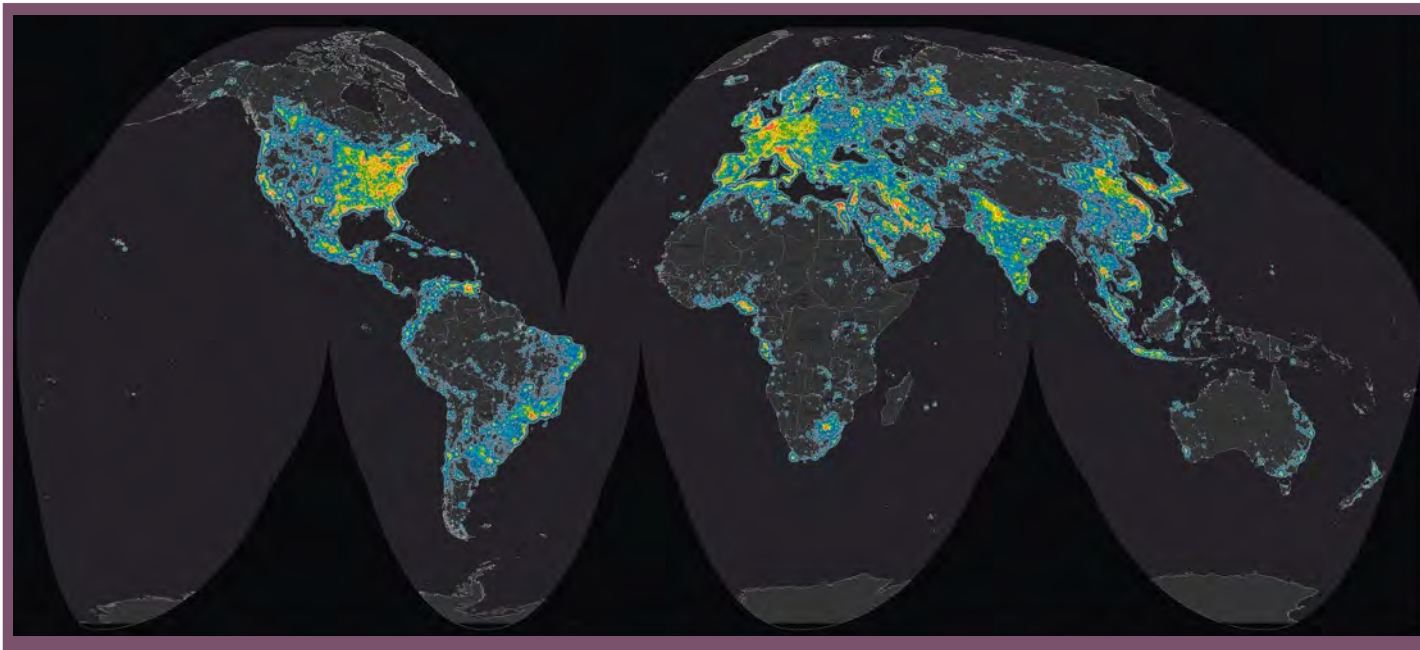


THIERRY LENGAGNE
chargé de recherche du CNRS au Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés, à l'université Lyon-1



NATHALIE MONDY
maîtresse de conférences à l'université Lyon-1, chercheuse au Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés

La lueur des agglomérations urbaines (ici Tarbes, vue de l'observatoire du pic du Midi de Bigorre), en étant diffusée par l'atmosphère et les nuages, crée un halo lumineux, ou *skyglow*, qui est perceptible jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres de distance. Cette pollution lumineuse affecte donc des milieux naturels même éloignés.



> phénomène et s'intéressent de près à ses conséquences sur la faune, voire sur la flore.

Depuis, les études se multiplient, et nous présenterons ici quelques-uns de leurs résultats. Au-delà de l'impact de la lumière artificielle nocturne sur les espèces vivant en ville, l'enjeu actuel des recherches consiste à comprendre les effets, sur la biodiversité, des faibles intensités lumineuses présentes dans les milieux naturels distants des centres urbains.

UN NOUVEL ACTEUR ENVIRONNEMENTAL

La lumière artificielle nocturne provient des activités humaines et des éclairages variés que nos sociétés ont mis en place: lampadaires urbains et routiers, phares des véhicules, panneaux publicitaires, éclairages domestiques et des lieux de travail... Ces éclairages directs, localisés, engendrent aussi un éclairage indirect et plus diffus, de faible puissance mais ayant une forte empreinte spatiale: c'est l'origine du halo lumineux, ou *skyglow*, créé par la lumière des agglomérations et visible dans le ciel jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines, de kilomètres de la zone ciblée par les éclairages directs. Un halo lumineux que certaines conditions atmosphériques, telles qu'une couverture nuageuse, accentuent en favorisant la diffusion de la lumière.

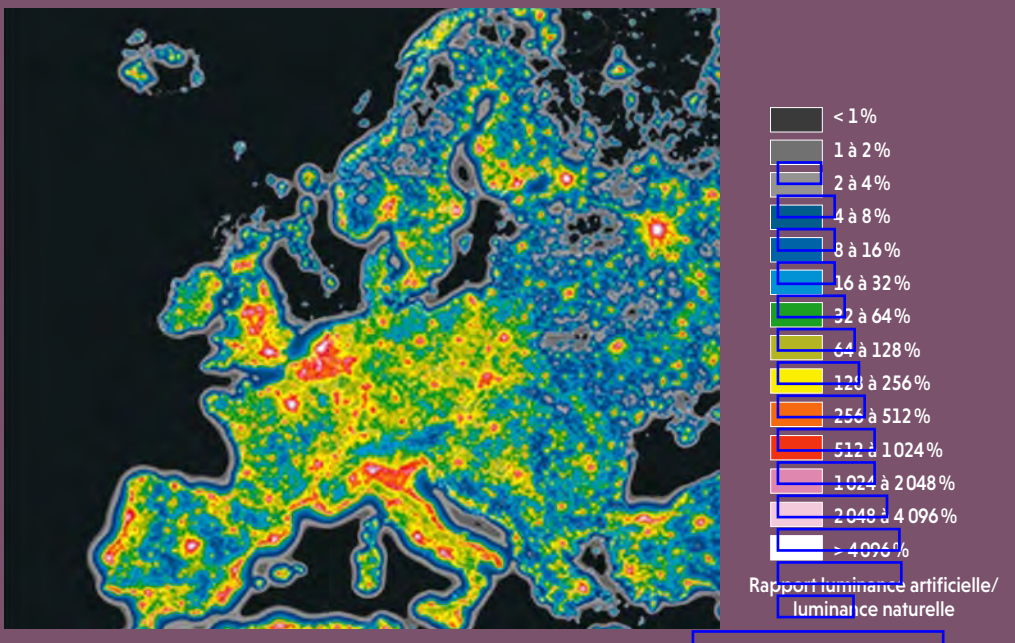
L'intensification des éclairages avec le développement de l'urbanisation constitue une nouvelle perturbation environnementale. L'expansion de la lumière artificielle nocturne est rapide, les superficies touchées s'accroissant d'environ 6% par an. En 2016, en tenant compte de la diffusion du halo lumineux, environ 23% de la surface totale des continents et

0,2% des surfaces océaniques étaient soumises à cette perturbation lumineuse.

Ces estimations ont été obtenues à partir de données satellitaires, qui ont permis à un groupe de physiciens réunis autour de Fabio Falchi, de l'Institut de science et technologie de la pollution lumineuse, à Thiene, en Italie, de réaliser un atlas mondial de la lumière artificielle nocturne (sa dernière version a été publiée en 2016).

Les données rassemblées par ces chercheurs montrent par exemple que l'intensité lumineuse nocturne en Europe varie d'un facteur 6800 entre la région la moins polluée par la lumière artificielle et la plus polluée. Et qu'en France métropolitaine, il n'existe plus de zones où le ciel est vierge de pollution lumineuse, c'est-à-dire où la luminosité nocturne a augmenté de moins de 1% par rapport à la lumière naturelle. Cette situation n'est pas propre à la France métropolitaine, mais concerne la plupart des pays développés (voir les cartes ci-dessus): les endroits où l'on peut profiter d'une nuit noire pour admirer la voûte céleste et la Voie lactée se font bien rares!

Outre l'apport de lumière pendant une période où les êtres vivants évoluent normalement dans l'obscurité, la lumière artificielle nocturne soumet ces organismes à des longueurs d'onde lumineuses différentes de celles provenant du Soleil, de la Lune ou des étoiles. Par exemple, les anciens lampadaires à vapeur de sodium ont un spectre d'émission plutôt étroit, dans l'orangé, tandis que les nouveaux dispositifs d'éclairage composés de diodes électroluminescentes (les LED à lumière blanche) ont un spectre d'émission large qui s'étend dans le bleu. De ce fait, les espèces



Ces cartes publiées en 2016 représentent par niveaux de couleur la brillance, ou luminance, du ciel nocturne due à la lumière artificielle, rapportée à la luminance naturelle (supposée être de 174 microcandelas par mètre carré). Le noir correspond à un rapport luminance artificielle/luminance naturelle inférieur à 1 %, le gris foncé à un rapport compris entre 1 et 2 %, puis la fourchette de rapports double d'une couleur à la suivante. Le blanc correspond à un rapport supérieur à 4 100 %. Dès que ce rapport dépasse environ 400 %, la Voie lactée n'est plus discernable...

vivantes sont exposées à des longueurs d'onde lumineuses peu ou jamais rencontrées pendant toute leur évolution, et l'on peut donc légitimement s'interroger sur leur capacité d'adaptation à ces nouvelles composantes.

LA MÉLATONINE, PRINCIPALE CIBLE HORMONALE

La lumière artificielle nocturne représente ainsi un nouveau facteur environnemental qui pose la question de la réaction et de l'adaptabilité, vis-à-vis de ce facteur, des animaux (dont les humains) et des végétaux.

La réponse à cette question suppose de savoir sur quoi agit la lumière artificielle nocturne. On sait aujourd'hui que, chez les animaux, elle perturbe les rythmes circadiens qui régulent la chronologie de diverses activités telles que l'alimentation, la sexualité, la veille et le sommeil..., mais aussi le métabolisme énergétique. Par exemple, en 2018, Morgane Touzot, doctorante à l'université Lyon-1, a montré qu'une pollution lumineuse nocturne de 5 lux (voir le tableau ci-dessous) induit chez le crapaud commun (*Bufo bufo*), dès la première nuit d'exposition, une diminution drastique (-56 %) de l'activité locomotrice des mâles en période de reproduction, ainsi qu'une augmentation de leur métabolisme énergétique de base (+28 %).

Ces rythmes circadiens dépendent d'un ensemble de gènes dont le fonctionnement est

largement modulé par une hormone, la mélatonine. Or celle-ci est la principale cible hormonale de l'éclairage artificiel nocturne. La mélatonine est généralement sécrétée la nuit par la glande pinéale, dans le cerveau, sa synthèse à partir d'un acide aminé (le tryptophane) étant inhibée par la lumière le jour. Même si la durée et l'intensité de libération de cette hormone varient selon les espèces, la sécrétion de mélatonine reflète la longueur de la nuit et est donc un marqueur de la photopériode, c'est-à-dire de la durée de l'éclairage du jour.

Par exemple, en 2016, l'équipe de Marcel Visser, à l'Institut d'écologie des Pays-Bas, a révélé que la production de mélatonine est supprimée ou diminuée chez des mésanges charbonnières exposées à une lumière nocturne variant de 0,05 à 5 lux. On retrouve des résultats similaires chez de nombreux oiseaux et mammifères, comme le wallaby de l'île Eugène (*Macropus eugenii*), un petit marsupial nocturne du sud de l'Australie, et chez certains poissons comme la perche soleil (*Lepomis gibbosus*).

Détaillons un peu le cas du wallaby de l'île Eugène. Chez cette espèce très sensible à la longueur du jour, la naissance des jeunes est synchronisée par la lumière naturelle et a lieu la sixième semaine après le solstice d'été. Or dans une étude publiée en 2015 par Kylie Robert, de l'université La Trobe, à Melbourne >

Les valeurs de l'éclairage (intensité lumineuse reçue par unité de surface) associée à quelques sources de lumière naturelles et artificielles. L'éclairage est exprimé en lux, sachant que 1 lux correspond à une intensité lumineuse de 1 lumen reçue sur 1 mètre carré. (À titre indicatif, une LED de 4,5 watts, à usage domestique, a un flux lumineux d'environ 500 lumens.)

Plein soleil	Partiellement ensoleillé	Ciel nuageux en journée	Habitations (intérieur)	Lampadaires urbains (routes)	Lampadaires urbains (zones résidentielles)	Plein lune (conditions claires)	Halo lumineux (skyglow)	Nuit étoilée (sans lune)
163 000	50 000	1 000 - 100 000	100 - 300	~10 - 40	5 - 10	0,3	~0,15	~0,001

> (Australie), et ses collègues, la comparaison de deux populations de la côte est de l'Australie (l'une exposée à de la lumière artificielle nocturne, l'autre non) a révélé un retard de un mois du pic de naissances chez les animaux de la zone polluée par la lumière. La croissance de l'embryon est normalement liée à de tout petits changements de la durée de la nuit, de l'ordre de six minutes, changements que les animaux ne peuvent plus percevoir dans les zones où sévit la pollution lumineuse. Comme chez toutes les espèces animales, les naissances sont souvent en phase avec le pic d'abondance de nourriture, et un décalage temporel trop important a généralement des conséquences graves sur la survie des jeunes et le maintien des populations.

L'impact biologique de la lumière artificielle nocturne dépend de son intensité, mais aussi des longueurs d'onde auxquelles sont exposés les animaux. Selon les travaux menés ces dernières années par Jenny Ouyang, de l'université du Nevada, et ses collègues, les longueurs d'onde courtes et moyennes comme le bleu (produites par les LED blanches), induisent chez les humains, les rongeurs, les oiseaux et les poissons une plus forte réduction de la synthèse de mélatonine que les grandes longueurs d'onde comme le orange-rouge.

UNE NOUVELLE FORME DE PERTURBATEUR ENDOCRINIEN

Une perception altérée de la longueur du jour a un impact important sur la reproduction saisonnière *via* une dérégulation de la production d'hormones sexuelles. Chez de nombreuses espèces, la longueur du jour constitue un signal pour le démarrage de l'activité reproductrice au printemps. En augmentant la durée perçue du jour, la lumière artificielle nocturne a pour conséquence d'avancer le début de leur saison de reproduction. C'est ce que l'on constate chez de nombreux oiseaux vivant dans des zones urbaines, par rapport à leurs congénères des zones rurales.

Au début des années 2010, afin d'évaluer les effets à long terme de l'exposition chronique à la lumière artificielle nocturne, Davide Dominoni et ses collègues de l'institut Max-Planck d'ornithologie, en Allemagne, ont soumis des merles à une faible intensité lumineuse nocturne (0,3 lux) en continu pendant deux ans. Au cours de la première année, les merles exposés à cette lumière présentaient un cycle gonadique fonctionnel, mais plus précoce que chez les oiseaux témoins. La deuxième année, leur appareil reproducteur ne s'est pas développé: la taille des testicules et la concentration de testostérone étaient au même niveau que celles enregistrées hors saison de reproduction.

Ainsi, la lumière artificielle nocturne affecte le fonctionnement de plusieurs systèmes



endocriniens et, à ce titre, on peut la considérer comme une nouvelle forme de «perturbateur endocrinien». Elle peut même provoquer, directement ainsi que *via* la modification du patron de sécrétion de la mélatonine, une sécrétion accrue d'hormones de stress (des glucocorticoïdes) chez les vertébrés.

Jenny Ouyang et ses collègues ont observé ce phénomène en 2015 chez des poussins de mésanges charbonnières élevés en milieu naturel avec de la lumière blanche la nuit, que les chercheurs comparaient à des poussins élevés sans lumière nocturne ou avec de la lumière verte ou rouge. Or une augmentation chronique du taux de glucocorticoïdes induit généralement une diminution des défenses immunitaires, bien que cet aspect n'ait pas été étudié chez les mésanges.

Le système immunitaire peut aussi être perturbé par d'autres voies. En exposant des grillons australiens *Teleogryllus commodus* à de la lumière nocturne, Joanna Durrant et ses collègues, de l'université de Melbourne, en Australie, ont en 2019 mis en évidence que l'immunité de ces insectes diminue. Pourtant, comme les autres insectes et arthropodes, ces grillons ne produisent pas de glucocorticoïdes. L'effet négatif de la pollution lumineuse sur l'immunité semble donc général, bien que les mécanismes en jeu restent à préciser.

La lumière nocturne modifie par ailleurs le comportement de nombreuses espèces animales. Certaines espèces sont attirées par la lumière (on parle de phototactisme positif), tandis que d'autres ont tendance à la fuir. Les espèces à phototactisme positif sont particulièrement vulnérables face à la lumière artificielle nocturne. En effet, une fois attirées, elles sont piégées par la source lumineuse et ne

Les tortues marines (ici des caouannes, *Caretta caretta*) qui naissent la nuit sur une plage doivent rejoindre dans les plus brefs délais la mer. Pour se diriger, elles s'appuient sur la différence de luminosité entre la partie océanique et la partie terrestre de leur horizon, la surface de la mer réfléchissant davantage la faible lumière ambiante. La présence d'éclairages artificiels sur le littoral perturbe cette orientation.

parviennent plus à s'en éloigner. C'est notamment le cas des insectes.

Gerhard Eisenbeis, de l'université Johannes-Gutenberg, et Andreas Hänel, du musée d'Osnabrück, en Allemagne, ont publié en 2009 leurs travaux montrant que les lampadaires classiques, équipés de lampe à vapeur de sodium, attiraient, dans le sud-ouest de l'Allemagne, en moyenne une centaine d'insectes par nuit durant l'été. Il s'agit essentiellement de diptères (mouches, moustiques...), de coléoptères et de lépidoptères (papillons de jour ou de nuit). Environ 30 à 40% des individus attirés meurent rapidement soit par la chaleur du contact avec la lampe, soit par déshydratation. Les autres restent le plus souvent piégés par la lumière, incapables de se nourrir ou de rechercher un partenaire pour la reproduction.

Pour se faire une idée de l'étendue des dégâts causés, prenons l'exemple de la France. D'après l'Association française de l'éclairage, il existe 9 millions de points lumineux d'éclairage public. Une simple multiplication indique alors qu'en un seul été, plus de 2 000 milliards d'insectes disparaissent à cause de l'éclairage public ! Et pour être complet, il faudrait ajouter tous les éclairages privés (vitrines, éclairages des particuliers, des sites industriels...). Ce chiffre, bien qu'approximatif, montre que

l'éclairage de nuit affecte de façon notable la biodiversité, puisque les insectes font souvent partie des premiers maillons de la chaîne alimentaire et qu'ils constituent la nourriture principale de nombreuses espèces de vertébrés, d'oiseaux en particulier, et d'autres arthropodes.

LES OISEAUX PIÉGÉS ET DÉSORIENTÉS

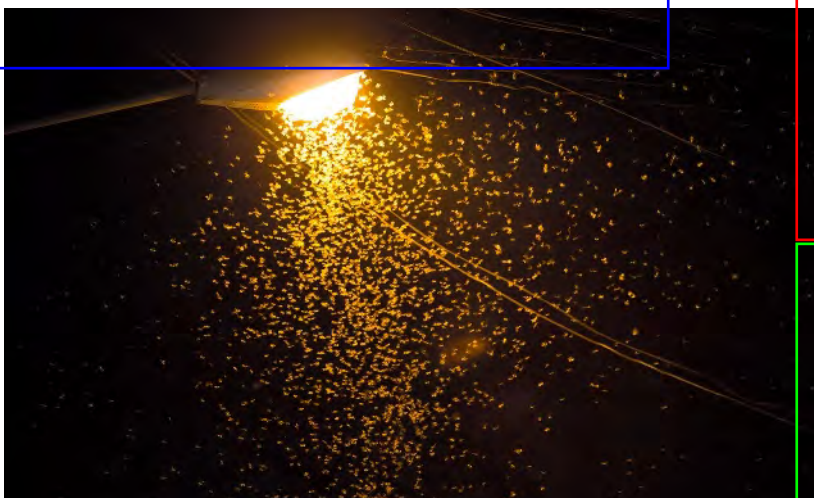
Les oiseaux aussi paient un lourd tribut à la pollution lumineuse. Alors que plus de la moitié des espèces migrent de nuit en utilisant la voûte céleste ou le champ géomagnétique pour s'orienter, la lumière artificielle nocturne altère leur comportement et interfère avec leur système d'orientation. Une étude publiée en 2017 par Benjamin Van Doren et ses collègues, du laboratoire Cornell d'ornithologie, aux États-Unis, le démontre. Ces chercheurs ont évalué, à l'aide de radars et de capteurs acoustiques, l'effet des deux faisceaux lumineux symbolisant les deux tours jumelles du World Trade Center, à New York. Ils ont estimé que ce monument mémoriel lumineux, nommé Tribute in Light, a « piégé » environ 1,1 million d'oiseaux lors des 49 jours de suivi (étalés entre 2008 et 2016) !

Beaucoup d'oiseaux s'épuisent à tourner en rond et un certain nombre d'entre eux tombent au sol ou finissent par percuter les bâtiments. L'organisation non gouvernementale Fatal Light Awareness Program a ainsi estimé que, chaque année, pour la seule ville de Toronto, au Canada, 1 à 10 millions d'oiseaux migrateurs périssent par collision avec les immeubles, les structures éclairées de nuit étant particulièrement meurtrières.

Enfin, plusieurs espèces utilisent la lumière présente naturellement la nuit pour s'orienter. C'est le cas de certains coléoptères, les bousiers, qui s'orientent grâce à la Voie lactée, ou des tortues marines, comme nous l'avons évoqué au début de l'article. Dans ces deux exemples, la pollution lumineuse perturbe l'orientation des animaux : les bousiers auront des difficultés à trouver leur source alimentaire et les tortues venant de naître tourneront le dos à la mer et se retrouveront sur les parkings et les routes du littoral, leurrées par la puissance des sources artificielles d'éclairage.

L'une des conséquences de la lumière artificielle nocturne et de la modification associée des comportements individuels est un changement dans les interactions des espèces. Grâce à leurs cycles de vie généralement courts, les insectes sont un groupe zoologique pour lequel cet aspect se prête à l'étude : on peut obtenir, sur une échelle de temps raisonnable, des informations sur la dynamique de leurs populations et le fonctionnement des communautés.

Les lampadaires de l'éclairage public tuent un nombre colossal d'insectes



> Selon l'intensité, la composition spectrale de l'éclairage et la sensibilité des organismes soumis à la lumière artificielle nocturne, certains groupes d'insectes subissent de plus forts risques de prédation en zones éclairées. Ainsi, en 1999, Astrid Heiling, de l'université de Vienne, en Autriche, a comparé le comportement de construction de toile des araignées *Larinioides sclopetarius*, communes près de l'eau et sur les ponts. De façon surprenante, ces arthropodes nocturnes préfèrent tisser leur toile dans des zones artificiellement éclairées, où elles capturent davantage d'insectes que dans les lieux sombres. De la même façon, des chercheurs ont montré qu'en induisant une plus grande abondance d'insectes près des lampadaires publics, la lumière artificielle nocturne a un fort impact sur les interactions des chauves-souris avec leurs proies et contribue à modifier la distribution spatiale des chiroptères, qui s'agrègent près des points lumineux.

DES COMMUNAUTÉS D'ESPÈCES CHAMBOULÉES

Au-delà de la distribution spatiale, la lumière artificielle nocturne affecte aussi la distribution temporelle des espèces. Ainsi, les espèces nocturnes se retrouvent en compétition avec des espèces diurnes qui prolongent leur activité sur une partie de la nuit artificiellement éclairée, ce qui peut affecter de façon durable la composition et le fonctionnement d'un ensemble d'espèces en interaction. Une étude parue en 2017 et conduite sur le terrain pendant trois ans par des chercheurs du groupe de Kevin Gaston, à l'université d'Exeter, en Angleterre, l'a démontré.

Elle a consisté à évaluer l'impact d'un éclairage artificiel nocturne, *via* des LED blanches, sur la structure et la composition en araignées et en coléoptères vivant dans et sur le sol. Les abondances relatives des espèces ont profondément changé par rapport aux conditions témoins, que ce soit pendant le jour ou la nuit et ce au cours des trois années. De plus, la densité d'individus des espèces prédatrices présentes sous les points d'éclairage était augmentée. Ces résultats montrent clairement que la lumière artificielle nocturne affecte les niveaux supra-individuels d'organisation du vivant, tels que les communautés (ensembles d'espèces en interaction).

Les populations de certaines espèces sont-elles réduites ou menacées par la pollution lumineuse? Les preuves directes d'un impact sur les tailles de populations sont rares, mais on peut s'attendre, *via* les effets sur les individus et les conséquences sur les relations interspécifiques, à des effets négatifs. Par exemple, une étude publiée en 2018 par Frank van Langevelde, de l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, et ses collègues suggère que la

lumière artificielle nocturne est l'un des facteurs du déclin des populations de papillons nocturnes constaté sur la période 1985-2015 aux Pays-Bas: ce sont les espèces ayant un fort phototactisme positif dont les populations avaient le plus diminué.

Plus récemment, fin 2019, Brett Seymoure, de l'université d'État du Colorado, et des collègues ont rassemblé dans une publication de nombreux arguments, en s'appuyant sur les études disponibles, suggérant que la lumière artificielle nocturne, en perturbant les mouvements, le développement, l'alimentation ou la reproduction des insectes, est un facteur important, mais sous-estimé, du déclin rapide de leurs populations.

Outre ses impacts sur la biodiversité, la lumière artificielle nocturne peut avoir des effets négatifs sur les services rendus à l'homme par les écosystèmes. Avec des collègues, Eva Knop, à l'université de Berne, en Suisse, en a fourni une élégante démonstration en 2017. Ces chercheurs ont mené une expérimentation en champs, avec des parcelles éclairées et d'autres maintenues dans l'obscurité naturelle, qui a montré explicitement les effets combinés de lumière artificielle nocturne sur les réseaux de pollinisateurs nocturnes et diurnes. Dans les zones éclairées, les interactions nouvelles entre les pollinisateurs diurnes et nocturnes, qui normalement ne se rencontrent pas, ont réduit le nombre de fleurs visitées aussi bien la nuit que, de façon plus surprenante, le jour. Avec, pour conséquence, une production de graines fortement diminuée.

Des effets de la pollution lumineuse nocturne sur la santé humaine sont également vraisemblables. On le suspecte dans le cas de certains cancers. De plus, des effets indirects sur la santé humaine sont possibles *via* la transmission de maladies véhiculées par des insectes. Par exemple, une étude publiée en 2012 et portant sur trois villages mexicains a montré que l'infestation des habitations par les punaises *Triatoma dimidiata* (qui se nourrissent de sang de vertébrés, dont les humains), vectrices de la maladie de Chagas, est notablement plus importante à proximité des sites d'éclairage public.

L'éclairage artificiel nocturne a-t-il toujours des conséquences négatives? Peut-être pas, puisque certaines espèces en profitent. Nous avons vu que certaines espèces de chauves-souris tirent parti de la lumière artificielle nocturne et tendent à chasser près des lampadaires, vers lesquels les insectes sont attirés. De même, on peut citer les travaux publiés en 2018 par Roy van Grunsven et ses collègues, de l'institut d'écologie IGB, à Berlin, montrant que certaines limaces profitent de la lumière artificielle nocturne pour s'alimenter en réduisant



Le Tribute in Light, structure lumineuse mise en place à New York pour commémorer l'attentat du 11 septembre 2001 contre les tours jumelles, perturbe notablement les espèces d'oiseaux migrant la nuit. Une équipe de chercheurs a estimé à 1,1 million le nombre d'oiseaux qui ont été piégés par ce mémorial lumineux au cours des 49 jours, répartis sur plusieurs années, ayant fait l'objet d'un suivi.



le risque de prédation et en augmentant le succès de la recherche de nourriture.

L'optimisme n'est pourtant pas de mise si l'on met ces résultats en regard des nombreux indicateurs d'effets négatifs. Néanmoins, des études portant sur le long terme sont nécessaires pour dresser un bilan rigoureux et objectif. De tels travaux permettront de décrire et quantifier les modifications des interactions (trophiques, compétitives, etc.) au sein des communautés d'espèces, et ainsi de prédire l'impact sur le fonctionnement des écosystèmes et les trajectoires évolutives que vont emprunter les espèces, trajectoires dont certaines peuvent mener à l'extinction...

QUELS REMÈDES?

Même si l'on ne connaît pas encore bien l'étendue des bouleversements dans les écosystèmes soumis à la pollution lumineuse, les altérations observées sont à présent si nombreuses qu'une concertation entre décideurs, législateurs, scientifiques et citoyens devient indispensable.

En France, l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne (ANPCEN) milite depuis 1999 pour le respect de la nuit et de l'environnement nocturne. Elle a joué un rôle primordial pour faire évoluer la législation française relative à l'éclairage nocturne (Grenelle de l'Environnement, loi sur la transition énergétique, loi de reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages). L'éclairage public faisant partie de la compétence de police du maire, c'est à lui

d'ajuster la durée, l'intensité et la qualité de la lumière artificielle nocturne et ce, même en cas de délégation de l'éclairage à un syndicat d'énergie (article L.2212-1 du code général des collectivités territoriales).

Les maires disposent de plusieurs leviers pour limiter la pollution lumineuse. Des centaines de communes programment leur éclairage public afin de l'éteindre une bonne partie de la nuit, période pendant laquelle les activités humaines et le besoin en lumière sont moindres. Ces communes peuvent bénéficier d'un label «villes et villages étoilés» indiquant une vraie réflexion locale sur les nuisances lumineuses.

Un éclairage mieux conçu contribue également à une limitation de la pollution lumineuse. Nous avons tous en mémoire les lampadaires «boules» qui dissipent l'essentiel de la lumière produite vers le ciel et non vers la chaussée. L'éclairage public a été repensé, avec des réflecteurs et des formes de lampadaire qui concentrent le flux lumineux sur la zone utile, mais des milliers de points lumineux restent encore à moderniser. Par ailleurs, l'essor des LED dans l'éclairage public a des effets pervers. D'une part, certaines communes profitent des économies d'énergie associées pour augmenter le nombre de points d'éclairage. D'autre part, on l'a vu, l'émission des LED utilisées a souvent une part importante de lumière bleue qui altère la sécrétion de mélatonine, des LED produisant une lumière plus chaude (orange-ambree) sont à privilégier.

Il est aussi possible de coordonner des actions à une échelle spatiale supérieure. Les premières mesures de réduction à une grande échelle de la pollution lumineuse ont été mises en œuvre afin de garantir le fonctionnement correct de certains observatoires astronomiques. C'est ainsi que la première réserve internationale de ciel étoilé (RICE) a été inaugurée en 2007 au Canada, près de l'observatoire du Mont-Mégantic. Cela s'est traduit par une réduction drastique des niveaux de la lumière artificielle nocturne dans les 25 communes autour de l'observatoire. En France, deux réserves ont été créées avec le même objectif (pic du Midi de Bigorre, en 2013, et parc national des Cévennes, en 2018). Enfin, ces dernières années, des travaux ont été menés autour du concept de «trame noire» afin d'identifier et maintenir un réseau écologique «refuge» caractérisé par son obscurité pour les animaux nocturnes.

Ainsi, il existe des solutions au problème de la pollution lumineuse, problème dont l'ampleur se révèle de plus en plus importante. Moyennant quelques efforts, il est possible de maintenir une nuit noire et réduire les effets néfastes de la lumière artificielle nocturne. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Desouhant et al., **Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects : Review and prospective**, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 167, pp. 37-58, 2019.

F. Falchi et al., **Light pollution in USA and Europe : The good, the bad and the ugly**, *Journal of Environmental Management*, vol. 248, 109227, 2019.

A. C. S. Owens et al., **Light pollution is a driver of insect declines**, *Biological Conservation*, vol. 241, article 108259, 2019.

T. W. Davies et T. Smyth, **Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century**, *Global Change Biology*, vol. 24, pp. 872-882, 2018.

F. Falchi et al., **The new world atlas of artificial night sky brightness**, *Science Advances*, vol. 2, e1600377, 2016.

K. J. Gaston et al. (dir.), **The biological impacts of artificial light at night : From molecules to communities**, numéro thématique de *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, n° 1667, 2015.

L'ESSENTIEL

> En avril 1784 parut à Paris une lettre anonyme proposant d'avancer l'heure du lever pendant l'été, avec à l'appui le calcul des économies d'éclairage à la bougie et à la chandelle qui y seraient associées.

> L'auteur de cette lettre, qui présentait tous les traits d'un canular, s'est révélé être Benjamin Franklin.

> Si celui-ci était bien connu outre-Atlantique pour son humour, l'accueil de ses propos fut plus circonspect en France.

> Tombée dans l'oubli, l'idée d'une heure d'été refit surface en France au xx^e siècle et fut adoptée en 1916 afin de réaliser des économies d'éclairage en temps de guerre.

L'AUTEUR



JACQUES GAPILLARD
professeur émérite
à l'université de Nantes,
où il a enseigné
les mathématiques
et l'histoire
de l'astronomie

Le canular de Benjamin Franklin

Se lever plus tôt l'été pour économiser des bouts de chandelles, c'est ce que proposait une curieuse lettre anonyme en 1784 dans un quotidien parisien. Son auteur n'était autre que Benjamin Franklin, dont les Français ont découvert l'humour à cette occasion...

Le 26 avril 1784, les lecteurs du *Journal de Paris* découvrirent en première page, sous le titre *Economie*, une longue lettre anonyme adressée «aux auteurs du journal» et développant une idée tout à fait nouvelle : se lever plus tôt l'été pour réaliser des économies. Bientôt, on apprit que son auteur, nommé par toutes les publications ultérieures, n'était autre que Benjamin Franklin.

Aujourd'hui, Benjamin Franklin est connu comme l'un des principaux pères fondateurs des États-Unis, le seul qui soit signataire à la fois de la Déclaration d'indépendance des États-Unis, en 1776, du Traité de Paris mettant fin à la Guerre d'indépendance, en 1783, et de la Constitution américaine, en 1787. Par ailleurs, chacun sait que cet esprit créatif et curieux est l'inventeur du paratonnerre et, sans doute moins, qu'on lui doit les lunettes à double foyer.

Mais ses talents se sont aussi exercés hors du domaine proprement scientifique, et le texte qui nous occupe est le premier où figure la proposition d'avancer aux beaux jours la plage quotidienne des activités humaines, avec les bénéfices de mieux profiter de la lumière du jour et de réaliser des économies. Alors, et même s'il ne s'agit pas encore d'avancer l'heure pendant une partie de l'année, Franklin semble bien être le précurseur de ceux qui, plus d'un siècle après lui, ont fait adopter par certains États le système de l'heure d'été. Mais est-ce vraiment le cas ? En cette période où la France se prépare à changer d'heure pour la 45^e année de suite malgré les doutes récurrents sur l'utilité d'un tel changement, il est instructif de se replonger dans ce texte qui semblera durablement l'idée dans les esprits.

Dans sa lettre, Franklin fixe d'abord les circonstances qui l'ont conduit à faire la découverte qu'il s'apprête à révéler au lecteur (voir l'encadré page 69). Tout commence par une >



Au XVIII^e siècle, on s'éclairait à la bougie ou à la chandelle, comme cette *Femme avec une bougie*, de Martin Ferdinand Quadal (1736-1811). Certains laissaient même les bougies et chandelles allumées toute la nuit, au cas où ils auraient besoin de se lever...

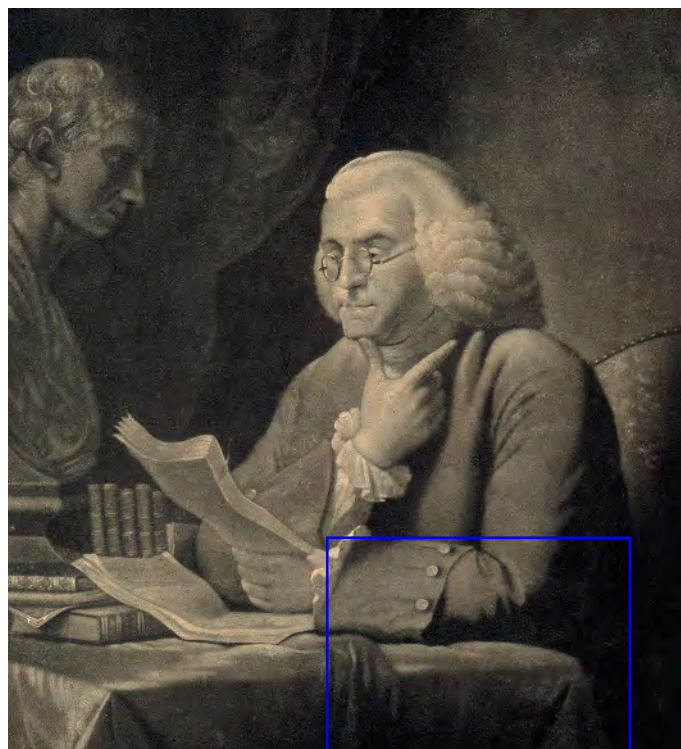
> démonstration de lampes à laquelle il dit avoir assisté, ce qui est très vraisemblable. D'une part, parce qu'il résidait alors à Paris, plus exactement à Passy, où il était arrivé le 21 décembre 1776 après avoir débarqué le 4 décembre à Saint-Goustan, le port d'Auray, dans le Morbihan. Faisant office d'ambassadeur, il avait signé le 6 février 1778 un accord d'alliance avec la France, où il est ensuite resté jusqu'en juillet 1785.

D'autre part, parce que c'est en effet en 1784, selon le *Journal de Paris* du 18 février, que le pharmacien Antoine Quinquet et l'épicier et distillateur ordinaire du roi, Ambroise Bonaventure l'Ange, ou Lange, ont fait la promotion de leur nouvelle lampe à huile, dite «à double courant d'air», dont la paternité leur fut contestée par le physicien et chimiste genevois Aimé Argand. Dans *Les Merveilles de la science* (1870), le vulgarisateur scientifique Louis Figuier a consacré de longues pages à la description de cette lampe et à cette affaire où, selon lui, Argand fut victime d'un plagiat qui l'a sévèrement affecté. Toujours est-il que le nom de Quinquet est resté attaché à ces lampes, dites «à la quinquet» puis simplement «quinquets», lesquelles furent supplantées par les lampes à pétrole vers le milieu du XIX^e siècle.

Quant au réveil prématuré de Franklin, le lendemain de la démonstration, à cause des volets restés ouverts par inadvertance, il s'agit d'un incident plausible. De plus, comme il nous apprend que le soleil se levait à Paris «à six heures précises» ce matin-là, il est même possible de fixer la date à laquelle cet incident est censé s'être produit. Publiées chaque année sans interruption depuis 1679, les éphémérides astronomiques calculées à Paris et intitulées *Connaissance des temps* étaient, à l'époque, la source où journaux et almanachs parisiens puisaient les données astronomiques qu'ils livraient à leurs lecteurs. Or, d'après ces éphémérides, c'est le 18 mars 1784 que le soleil s'est précisément levé à 6 heures 0 minute à Paris.

DES ÉCONOMIES DE BOUTS DE CHANDELLES...

Après le préambule, dont la seconde partie comportait déjà une part d'exagération, le discours de Franklin bascule résolument dans la galéjade quand il annonce comme sa découverte la propriété du soleil de nous éclairer dès l'instant où il se lève, une découverte tellement surprenante qu'elle rencontre l'incrédulité! Mais Franklin insiste plus loin: «C'est là ce que je revendique comme ma découverte»... Ajoutons que, selon l'heure vraie du soleil alors en usage, «onze heures ou midi» à Paris – heure à laquelle Franklin suppose que beaucoup se lèvent – correspondent à peu près à 13 ou 14 heures de notre heure d'été. De tels horaires de lever n'auraient pu concerner qu'une minorité de Parisiens, oisifs et couche-tard.



Cependant, Franklin change encore de ton en se livrant alors au calcul de la somme que, selon lui, les Parisiens pourraient épargner s'ils profitaient mieux de la lumière du jour:

Je prends pour base de mon calcul la supposition qu'il y a 100 mille familles à Paris qui consomment chacune, pendant la durée de la nuit, & les unes dans les autres, une demi-livre de bougie ou de chandelle par heure. Je crois cette estimation modérée, car quoique quelques-unes consomment moins, il y en a un grand nombre qui consomment beaucoup davantage. Maintenant je compte environ sept heures par jour pendant lesquelles nous sommes encore couchés, le soleil étant sur l'horizon; car il se lève pendant six mois entre six & huit heures avant midi, & nous nous éclairons environ sept heures dans les vingt-quatre avec des bougies & des chandelles. Ces deux faits me fournissent les calculs suivants:

Les six mois du 20 Mars au 20 Septembre me donnent 183 nuits. Je multiplie ce nombre par sept pour avoir le nombre des heures pendant lesquelles nous brûlons de la bougie ou de la chandelle, & j'ai 1281. Ce nombre multiplié par 100 mille, qui est celui des familles, donne 128,100,000 heures de consommation. A supposer, comme je l'ai dit, une demi-livre de bougie ou de chandelle consommée par chaque heure dans chaque famille, on aura 64,050,000 liv. pesant de cire ou de suif consommées à Paris; & si l'on estime la cire & le suif l'un dans l'autre au prix moyen de 30 sols la livre, on aura une dépense annuelle de 96,075,000 livres tournois en cire & suif. Somme énorme! que la seule ville de Paris épargnerait en se servant, pendant

Benjamin Franklin (1706-1790),
ici par E. Savage (1793), d'après
une peinture de David Martin (1767).

les six mois d'été seulement, de la lumière du Soleil, au lieu de celle des chandelles & des bougies; & voilà, Messieurs, la découverte que j'annonce & la réforme que je propose.

... QUI REPRÉSENTENT UNE SOMME CONSIDÉRABLE

Pour comprendre la pertinence de ce calcul, il faut savoir qu'à cause de l'incommodité d'avoir à allumer une bougie dans l'obscurité si l'on devait se lever, une ou plusieurs bougies brûlaient toute la nuit dans les appartements, et aussi longtemps que les occupants n'avaient pas ouvert leurs volets, que Franklin suppose étanches à la lumière. Il existait même des bougies destinées à cet usage, dites «bougies de nuit» ou «de veille». Le physicien Henri Louis Duhamel du Monceau décrivait déjà ces bougies et leur fabrication en 1762, dans *L'Art du cirier*: «Tout le monde connaît l'usage de cette espèce de bougies, & sait qu'on les plonge perpendiculairement dans l'eau avant de les allumer; ce qui prolonge leur durée [...] Ces bougies étant destinées à brûler toute la nuit, on proportionne leur longueur à la durée des nuits d'été ou d'hiver.»

Franklin entreprend donc de prouver que, s'il s'agit littéralement d'économies de bouts de chandelles, celles-ci représentent en réalité une somme considérable. Notons que Franklin évoque conjointement «bougies & chandelles» ou «cire & suif» par souci de précision, car le vocabulaire de l'époque distinguait les chandelles de suif, relativement bon marché mais fumeuses et malodorantes, des bougies de cire en usage dans les milieux plus aisés, apparues bien plus tard.

Cependant, le résultat du calcul est amplifié par les présupposés de Franklin, comme considérer que tous les Parisiens dorment dans des chambres dont les fenêtres sont munies de volets, ce qui est certainement loin d'être le cas, ou encore l'exagération des sept heures pendant lesquelles ils dormiraient quotidiennement après le lever du jour, et ceci du 20 mars au 20 septembre. Il aurait même dû obtenir un résultat encore un peu supérieur si, dans l'intervalle entre ces deux dates, sous-entendu de midi à midi, il avait compté correctement 184 nuits au lieu de 183. Cela dit, comme la population de Paris était d'environ 600 000 habitants à l'époque, le nombre de >

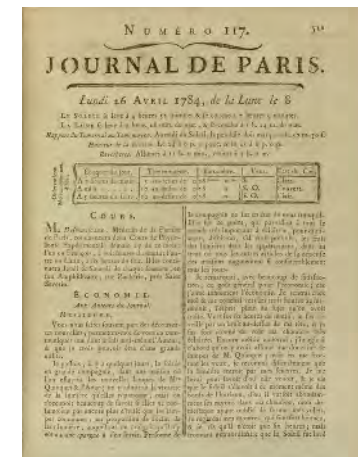
LETTRE D'UN ABONNÉ ANONYME

Messieurs, Vous nous faites souvent part des découvertes nouvelles; permettez-moi de vous en communiquer une dont je suis moi-même l'Auteur, & que je crois pouvoir être d'une grande utilité. Je passais, il y a quelques jours, la soirée en grande compagnie, dans une maison où l'on essayait les nouvelles lampes de M^{re} Quinquet & l'Ange; on y admirait la vivacité de la lumière qu'elles répandent, mais on s'occupait beaucoup de savoir si elles ne consumaient pas encore plus d'huile que les lampes communes, en proportion de l'éclat de leur lumière, auquel cas on craignit qu'il n'y eût aucune épargne à s'en servir. Personne de la compagnie ne fut en état de nous

tranquilliser sur ce point, qui paraissait à tout le monde très important à éclaircir; pour diminuer, disait-on, s'il était possible, les frais des lumières dans les appartements, dans un temps où tous les autres articles de la dépense des maisons augmentent si considérablement tous les jours.

Je remarquai, avec beaucoup de satisfaction, ce goût général pour l'économie; car j'aime infiniment l'économie. Je rentrai chez moi & me couchai vers les trois heures après-midi, l'esprit plein du sujet qu'on avait traité. Vers les six heures du matin, je fus réveillé par un bruit au-dessus de ma tête, & je fus fort étonné de voir ma chambre très éclairée. Encore moitié endormi, j'imaginai d'abord qu'on y avait allumé une douzaine de lampes de M. Quinquet; mais en me frottant les yeux, je reconnus distinctement que la lumière entraînait par mes fenêtres. Je me levai pour savoir d'où elle venait, & je vis que le soleil s'élevait à ce moment même des bords de l'horizon, d'où il versait abondamment ses rayons dans ma chambre, mon domestique ayant oublié

de fermer mes volets. Je regardai mes montres, qui sont fort bonnes, & je vis qu'il n'était que six heures; mais trouvant extraordinaire que le soleil fût levé de si bon matin, j'allai consulter l'Almanach, où l'heure du lever du soleil était en effet fixée à six heures précises pour ce jour-là. Je poussai un peu plus loin ma recherche, & je lus que cet astre continuerait de se lever tous les jours plus matin jusqu'à la fin du mois de Juin; mais qu'en aucun temps de l'année il ne retardait son lever jusqu'à huit heures. Vous avez sûrement, Messieurs, beaucoup de Lecteurs des deux sexes qui, comme moi, n'ont jamais vu le soleil avant onze heures ou midi, & qui lisent bien rarement la partie astronomique du calendrier de la Cour; je ne doute pas que ces personnes ne soient aussi étonnées d'entendre que le soleil se lève de si bonne heure, que je l'ai été moi-même de le voir. Elles ne le seront pas moins de m'entendre assurer qu'il donne la lumière au même moment où il se lève; mais j'ai la preuve du fait. Il ne m'est pas possible d'en douter. Je suis témoin oculaire de



ce que j'avance, & en répétant l'observation les trois jours suivants, j'ai obtenu constamment le même résultat. Je dois cependant vous dire, que lorsque j'ai fait part de ma découverte dans la société, j'ai bien démêlé dans la contenance & à l'air de beaucoup de personnes un peu d'incrédulité, quoiqu'elles aient eu assez de politesse pour ne pas me le témoigner en termes exprès. [...] J'ai l'honneur d'être, &c., Un Abonné. Journal de Paris, 26 avril 1784.

> familles retenu par Franklin est plausible et, à raison de 20 sols par livre tournois, son calcul est arithmétiquement exact.

Afin d'inciter les Parisiens à se lever plus tôt, Franklin suggère trois «règlements» que pourraient adopter les autorités, dont le tir au canon prévu par le troisième devrait rappeler au lecteur, s'il l'avait oublié, que le discours n'est pas sérieux :

1°. Mettre une taxe d'un louis sur chaque fenêtre qui aura des volets empêchant la lumière d'entrer dans les appartements aussitôt que le soleil est sur l'horizon.

2°. Établir pour la consommation de la cire & de la chandelle dans Paris, la même loi salutaire de Police qu'on a faite pour diminuer la consommation du bois pendant l'hiver qui vient de finir, placer des Gardes à toutes les boutiques de Ciriers & de Chandeliers, & ne pas permettre à chaque famille d'user plus d'une livre de chandelle par semaine.

3°. Faire sonner toutes les cloches des Églises au lever du soleil; & si cela n'est pas suffisant, faire tirer un coup de canon dans chaque rue, pour ouvrir les yeux des paresseux sur leur véritable intérêt.

La version longue, publiée en 1790 dans le journal *American Museum*, intercale un quatrième «règlement» entre les deux derniers : «Placer également des gardes pour arrêter tous les carrosses, &c. qui voudraient passer dans les rues après le coucher du soleil, à l'exception de ceux des médecins, chirurgiens et sages-femmes.»

Enfin, c'est en insistant sur le caractère novateur de sa découverte que Franklin termine son discours, après avoir déclaré qu'il ne prétendait en retirer aucun bénéfice pour lui-même. Ce désintéressement n'est pas seulement un ornement de plus que Franklin apporte à son texte; il correspond réellement à sa pensée. Dans son autobiographie publiée en 1869, il rapporte qu'en 1742, il s'était vu proposer un brevet au sujet d'un poêle de son invention. Mais il avait décliné cette offre selon le principe que, «comme nous retirons de grands avantages des inventions des autres, nous devons nous réjouir d'avoir l'occasion de rendre service à autrui par une de nos inventions; et ceci nous le ferons gratuitement et généreusement».

UN LECTORAT PERPLEXE

En 1784, le texte de Franklin fut très mal reçu par les lecteurs du *Journal de Paris*. Bien qu'aucune de leurs réactions n'apparaisse dans les colonnes de ce quotidien, nous le savons, car, dès le 27 avril, le bibliothécaire de l'abbaye de Sainte-Geneviève, Barthélemy Mercier de Saint-Léger, avait, lui, adressé au journal une lettre enthousiaste publiée plus tard avec cette note de Mercier : «Non imprimée, parce que cette plaisanterie n'avait pas réussi, et que MM. du *Journal* ne voulaient pas la rappeler.» Il faut



dire que la lettre de Mercier débutait ainsi : «L'inestimable découverte annoncée dans le *Journal de Paris* d'hier, Messieurs, m'a pénétré d'admiration pour son auteur.» Et il poursuivait sur le même ton, renchérissant encore sur Franklin en faisant valoir que les économies ne concerneraient pas seulement l'éclairage, mais aussi le chauffage. On comprend qu'après avoir essuyé les protestations de beaucoup de lecteurs, les éditeurs du *Journal de Paris* n'avaient pas souhaité en rajouter.

En 1795, trois périodiques (*La Décade philosophique*, le *Mercure français* et le *Journal de Paris*) publièrent la lettre de Franklin, en version longue (d'ailleurs, curieusement, en la déclarant inédite...). Ils justifiaient cette publication par son intérêt économique dans un contexte devenu difficile. Ils ne furent pas contestés sur ce point, mais, le 3 décembre 1795, le *Journal de Paris* publia une lettre anonyme dont l'auteur était Pierre Louis Roederer. Connue pour son rôle politique, il reprochait à *La Décade* et au *Journal* d'avoir imprimé une lettre qu'ils n'avaient pas reçue de Franklin : «Sans doute, en la relisant, il en avait trouvé la plaisanterie froide et insipide, puisqu'il ne vous l'avait pas adressée, et bien des gens pensent qu'il avait raison.» Roederer craignait aussi que, «dans un moment [...] de ferveur républicaine tel que celui où nous nous trouvons, [...] on prît à la lettre et au sérieux, les expédients peu plaisants que Franklin ne propose pourtant que par plaisanterie».

Le *Journal* annonçait répondre «incessamment» à cette lettre, ce qu'il n'a pas fait, mais il en a publié une autre le 11 décembre, écrite par Quinquet en réaction à celle de Roederer. En n'oubliant pas de faire de la publicité pour ses lampes, le pharmacien y défendait l'idée

Sur cette illustration de la lettre de Franklin, parue en 1834, le dessinateur a placé au chevet du savant une lampe de Quinquet, qu'il n'était pas censé posséder ce matin-là.

Vers les six heures du matin, je fus réveillé par un bruit au-dessus de ma tête, & je fus fort étonné de voir ma chambre très éclairée

Benjamin Franklin

économique de Franklin, car, sans la connaître, cela faisait déjà plus de six mois qu'il avait « communiqué à plusieurs personnes, et à diverses commissions » de semblables idées d'économies. Lui non plus n'avait-il donc pas lu le *Journal* du 26 avril 1784 ? Mais si ce quotidien n'a pas répondu à la lettre de Roederer, ce dernier l'a fait lui-même : il a en effet envoyé au *Journal* une autre lettre anonyme où il propose quelques réponses !

Par la suite, la lettre de Franklin est plus ou moins tombée dans l'oubli en France et n'en est sortie qu'en 1916, à l'occasion des discussions suscitées par un projet d'« avance de l'heure » pendant une partie de l'année. En particulier, plusieurs quotidiens ont livré des extraits de cette lettre à leurs lecteurs. Mais les jugements émis à son sujet furent rares et, si certains ont loué Franklin pour son idée, on les devine assez embarrassés par le ton qu'il a employé. C'est certainement le cas de Camille Couderc, qui, dans le *Bulletin de la Société d'Histoire de Paris*, présente ainsi le texte de Franklin : « Cette lettre est un peu longue et, par endroits, d'une ironie un peu lourde. » C'est le moins que l'on puisse dire ! Mais il ajoute : « Son intérêt rétrospectif, cependant, semble assez grand pour justifier sa réimpression. »

UN HUMORISTE AGUERRI

Bien différent du précédent est le commentaire du physiologiste Charles Richet, Prix Nobel en 1913, qui, dans *Le Figaro* du 19 avril 1916, signala un « curieux article [du] grand Franklin », dont il donna une version abrégée avant de conclure : « Quoique cent trente-deux ans se soient écoulés depuis

l'observation pénétrante faite par Franklin, il est probable qu'en 1916 comme en 1784, le soleil éclaire dès qu'il est levé. » Nul doute que Richet avait bien compris que Franklin plaisantait.

Outre-Atlantique, en revanche, les talents d'humoriste de Franklin étaient déjà bien connus. Il avait exercé cette activité en particulier dans le *Poor Richard's Almanack* (*Almanach du Bonhomme Richard*), publié à Philadelphie de 1732 à 1757. Aussi, lorsque sa lettre a été imprimée en 1790 dans cette même cité et présentée comme « une importante découverte par le dr. Franklin », personne là-bas n'a pu se méprendre sur le sens de son discours.

De fait, le texte de Franklin possède plusieurs ingrédients du parfait canular : récit circonstancié s'appuyant sur une authentique démonstration de lampes, incident plausible des volets non rabattus, calcul détaillé des économies réalisables. Sans oublier les clin d'œil : une touche de naïveté, l'exagération du tir au canon dans les rues et surtout l'enormité de sa découverte ! Avec ce texte humoristique très habilement composé, sans nul doute un morceau d'anthologie, Franklin se situe dans la succession de l'écrivain irlandais Jonathan Swift, du moins si l'on pense, en oubliant ici la noirceur de l'humour, à la *Modeste Proposition* (1729) de ce dernier pour réduire la misère en Irlande : nourrir le peuple affamé avec de la viande de nourrisson.

Les travaux scientifiques de Franklin lui avaient valu de devenir, en 1756, *fellow* de la Royal Society de Londres, qui lui avait décerné la médaille Copley en 1753, et membre associé étranger de l'Académie des sciences de Paris en 1772. En raison de cette notoriété, on imagine mal qu'il aurait choisi de présenter son idée d'heure d'été de façon humoristique s'il avait été convaincu de son utilité. Au contraire, c'est peut-être à la suite de l'incident réel des volets que lui serait venue une autre idée, celle purement facétieuse d'écrire une blague autour d'une proposition d'avance du lever qu'il n'aurait jamais sérieusement envisagée. En l'occurrence, Benjamin Franklin mériterait bien davantage d'être reconnu comme talentueux humoriste que comme précurseur.

En France, la nécessité de réaliser des économies en temps de guerre a conduit le député André Honnorat à déposer un projet de loi le 21 mars 1916. De longues discussions aboutirent à la loi du 9 juin qui instituait une heure d'été, en avance d'une heure sur celle de Greenwich adoptée en 1911. Seule l'année 1916 était d'abord concernée, mais la pratique de cette heure d'été a subsisté jusqu'en 1939. Non retenue à la Libération, l'heure d'été est réapparue en 1976 à des fins d'économies d'énergie après le choc pétrolier de 1973. Franklin n'aurait sans doute pas imaginé une telle issue à son canular... ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Gapailtard, *Histoire de l'heure en France*, Vuibert, 2011.

P. M. Zall, *Benjamin Franklin's humor*, The University Press of Kentucky, 2005.

Bulletin de la Société d'Histoire de Paris, pp. 93-101, 1916.

L. Figuier, *Les Merveilles de la science*, tome 4, pp. 14-27, 1870.

Œuvres du comte P. L. Roederer, t. 5, 1857.

Journal de Paris, n° 117, 26 avril 1784.

R

ENDEZ-VOUS

P.72 Logique & calcul
P.78 Art & science
P.80 Idées de physique
P.84 Chroniques de l'évolution
P.89 Science & gastronomie
P.90 À picorer

QUAND LES MACHINES FONT DES MATHÉMATIQUES

Les intelligences artificielles seront-elles un jour capables de produire des théorèmes aussi intéressants que ceux des mathématiciens humains? On en est encore loin, mais les choses avancent peu à peu.

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).

Il est évident que l'invention et la découverte, que ce soit en mathématiques ou ailleurs, se fait en combinant des idées. Or, il existe un très grand nombre de combinaisons possibles, dont la plupart sont sans intérêt, alors qu'au contraire très peu d'entre elles sont fructueuses. Lesquelles notre esprit, notre esprit conscient, perçoit-il? Celles qui sont fructueuses ou qui pourraient l'être.

Jacques Hadamard, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Albert Blanchard, 1959.

Les ordinateurs aident les mathématiciens d'une multitude de manières: ils facilitent l'édition des textes et la communication entre chercheurs; ils font des calculs numériques et symboliques, en produisant par exemple des milliers de milliards de décimales de π ; grâce aux programmes «assistants de preuves», ils aident les mathématiciens à mettre au point les longues démonstrations et à les vérifier; parfois, les algorithmes de démonstration automatique découvrent des

preuves qu'aucun mathématicien n'avait trouvées (voir l'encadré 1).

Cependant, à côté de cette aide exploitant la fiabilité et la rapidité des machines, est-ce que celles-ci peuvent se substituer aux chercheurs et faire avancer un domaine mathématique en y découvrant de nouvelles idées, de nouvelles formules, de nouvelles conjectures ou de nouveaux théorèmes intéressants?

On a précisé «intéressants», car on sait depuis longtemps produire mécaniquement des théorèmes en utilisant des programmes. À chaque système axiomatique, celui de l'arithmétique, celui de la théorie des ensembles, etc., est associé un algorithme qui énumère les théorèmes. Malheureusement ces algorithmes d'énumération produisent des masses de résultats évidents et sans valeur.

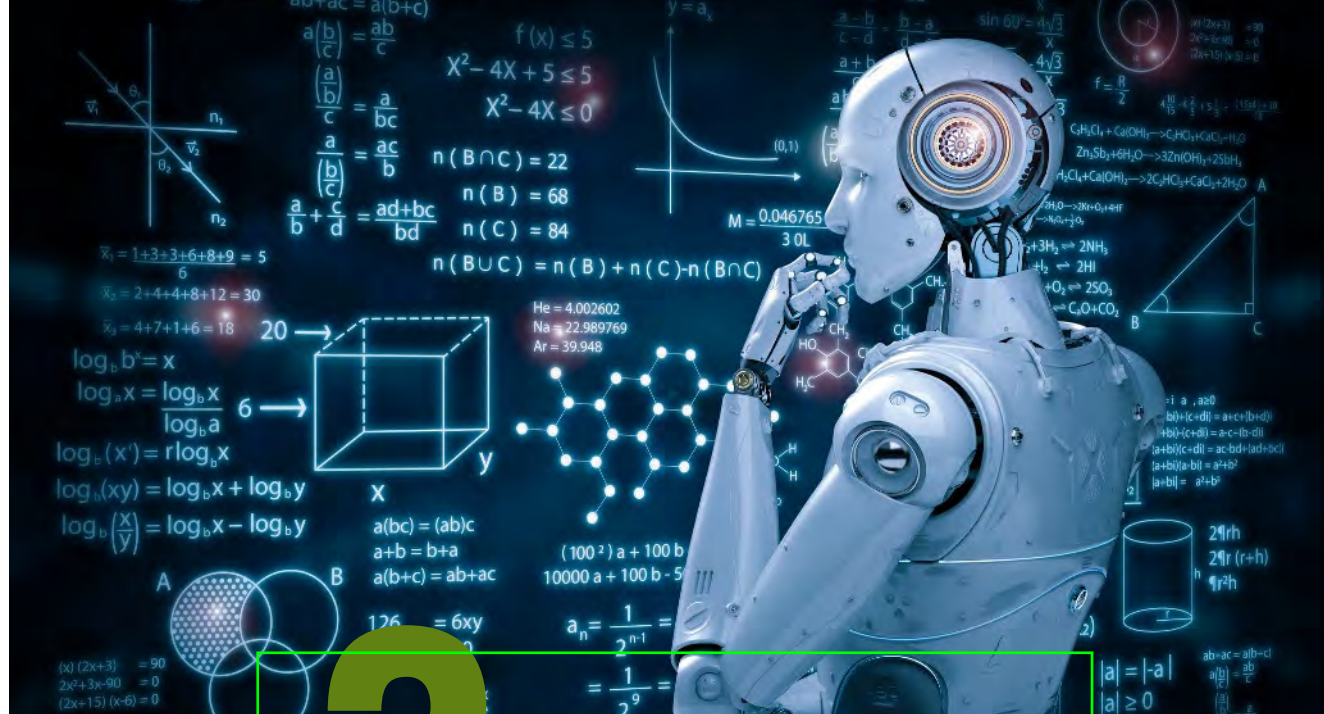
L'intelligence, le savoir particulier et l'intuition d'un mathématicien lui font aborder un domaine avec finesse en repérant des énoncés particuliers, en général assez courts et difficiles à démontrer. Ces énoncés sont des jalons dans leurs travaux; ils leur évitent de se perdre dans

QUELS TYPES DE RECHERCHES?

L'intelligence artificielle en mathématiques a trois objectifs.
(a) L'aide à la démonstration et à la rédaction détaillée et contrôlée de démonstrations compliquées. Dans ce domaine, des succès ont été obtenus, comme la mise au point

définitive de la démonstration de la conjecture de Kepler sur l'empilement le plus compact possible des sphères dans l'espace, démonstration due à Thomas Hales en 2014.
(b) La démonstration automatique : l'ordinateur recherche seul une

démonstration. Quelques succès ont été obtenus.
(c) La recherche et la suggestion d'idées, de conjectures et de théorèmes nouveaux et intéressants. C'est ce dernier aspect qui est principalement envisagé dans cet article.



FAIRE DES CONJECTURES INTÉRESSANTES

l'infini des vérités faciles et trop proches les unes des autres. L'intelligence artificielle peut-elle concevoir des méthodes qui égalent les mathématiciens dans le travail d'imagination et de construction ordonnée des théories mathématiques, qui ne sont pas des successions ennuyeuses de vérités triviales comme $1+1=2$, $1+2=3$, $1+3=4$, etc.?

Nous allons voir que la « recherche automatisée » progresse petit à petit : il se peut que, imperceptiblement, nous entrons dans une nouvelle ère.

PREMIÈRES TENTATIVES

Le logicien Hao Wang, un ami d'Einstein à Princeton, écrit en 1959 un programme pour produire et sélectionner des théorèmes du calcul propositionnel, une partie de la logique où l'on traite de formules du type $(A \text{ et } B) \Rightarrow A$, $(A \text{ ou non-}A)$, $(A \Rightarrow B) \Rightarrow (\text{non-}B \Rightarrow \text{non-}A)$. Cette tentative lui fit prendre conscience que le problème principal était de sélectionner les résultats « intéressants », mais le domaine trop étroit du calcul propositionnel fit qu'aucun résultat spectaculaire ne sortit de cette première tentative.

En juillet 1976, Douglas Lenat soutint à Stanford un mémoire de doctorat dont le sujet était son « mathématicien automatique », le programme AM (pour Automated Mathematician). Il y décrivait un programme en langage LISP, qui, à partir de règles et de manipulations symboliques, déduit et accumule des concepts et des propriétés de ces concepts. Douglas Lenat explique que son programme a découvert la notion de nombre premier, a énoncé le théorème de décomposition d'un nombre en facteurs premiers. Il aurait aussi redécouvert la fameuse conjecture

Pour concevoir des systèmes menant une recherche mathématique, il faut faire en sorte que ces systèmes effectuent des tris. Un tel système ne doit retenir que les propriétés et conjectures les plus intéressantes. Le Britannique Simon Colton, qui a développé le système HR (voir le texte principal), propose six critères pour repérer les conjectures intéressantes.

1) Les conjectures doivent être plausibles. Il faut éliminer celles qui sont fausses parce qu'il existe des exemples simples qui les contredisent.

2) Les conjectures doivent être nouvelles. Le système doit disposer des résultats connus sur le sujet étudié et savoir les exploiter pour ne pas proposer les conséquences immédiates de résultats connus.

3) Les résultats envisagés doivent être étonnants. John Conway pense qu'un résultat est d'autant plus intéressant qu'il est « scandaleux » (outrageous). Il est délicat de concevoir des programmes sachant définir ce qui est « étonnant ». Le plus souvent, on se contente d'éliminer les énoncés qui sont des conséquences immédiates d'énoncés connus ou qui sont des cas particuliers de formules logiques toujours vraies, comme $\text{non}(\text{non-}A) \Leftrightarrow A$. Une propriété simple qui exige une longue démonstration est étonnante puisqu'on ne peut pas comprendre aisément ce qui la rend vraie. Malheureusement, la notion de « exige une longue

démonstration » est impossible à programmer en pratique, car, pour l'affirmer d'un énoncé, il faudrait explorer tous les chemins de démonstrations possibles pouvant y conduire.

4) Les conjectures doivent concerner de nombreux cas.

Si l'on s'intéresse à des propriétés P_1 et P_2 , la conjecture $P_1 \Rightarrow P_2$ n'est intéressante que si une grande proportion des objets jouit de la propriété P_1 .

5) Les conjectures doivent être facilement

compréhensibles et donc doivent avoir des énoncés assez courts et si possible ne faire intervenir que les concepts de base de la théorie étudiée.

6) Les conjectures doivent être fécondes et par exemple avoir beaucoup de

conséquences simples. En mathématiques, il est difficile d'anticiper cette qualité d'une conjecture. Le grand théorème de Fermat n'est considéré comme fécond que parce qu'il a résisté pendant des siècles. Si Fermat l'avait démontré en quelques lignes, personne n'aurait estimé l'énoncé de ce théorème comme intéressant.

Sur ce sujet, voir : S. Colton et al., « On the notion of interestingness in automated mathematical discovery », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 53(3), pp. 351-375, 2000.

> de Goldbach, toujours non démontrée («Tout nombre pair à partir de 4 est somme de deux nombres premiers»). Cependant, ces affirmations ont été discutées car elles résultent d'une interprétation indirecte *a posteriori* des calculs d'AM et parce qu'il est difficile de savoir si ce qui est présent dans le programme avant sa mise en route n'est pas déjà suffisamment déterminant pour que de telles «découvertes» se produisent nécessairement.

Ce problème de savoir si un système fait vraiment une découverte ou s'il est forcé de la faire par les mécanismes simples programmés au départ se retrouvera pour tous les systèmes qui ont succédé à cette tentative de mathématicien automatique. La résolution de cette difficulté ne peut provenir que de la découverte par la machine d'idées ou de propriétés nouvelles et reconnues intéressantes par les mathématiciens eux-mêmes.

Après ce premier essai, Douglas Lenat travailla sur un système nommé Eurisko, lui aussi destiné à produire des découvertes mathématiques. Son originalité est qu'il créait spontanément des règles heuristiques nouvelles à l'aide de métarègles du type: «Donner la priorité aux règles les plus simples». Face aux difficultés à obtenir des résultats concluants, Douglas Lenat entreprit de concevoir et programmer un système dénommé Cyc, qui maîtrise des connaissances générales de tout humain, ce qu'il considérait comme indispensable pour aller plus loin en intelligence artificielle (IA). Pour lui, un système intelligent doit savoir que «si un humain marche, il ne reste pas à la même place» ou que «quand il pleut, les passants dans la rue sont mouillés et certains ouvrent des parapluies», etc.

Le projet Cyc, démarré en 1983, a bénéficié depuis d'un travail équivalent à plus de mille hommes-années et se poursuit aujourd'hui encore. C'est le plus ambitieux et long projet d'intelligence artificielle jamais mené. Il a

développé un savoir général et plusieurs savoirs particuliers liés à des sous-domaines, dont celui du terrorisme qui est probablement utilisé par l'agence américaine NSA (National Security Agency). Le système connaît plus d'un million de termes comme «la France», «le kilogramme», «New York», «les poissons», «la chasse»... et plus de 24 millions d'affirmations de base les concernant et les liant. Elles sont écrites dans un langage logique et disposent d'un système de déduction qui permet, à partir des affirmations de base, d'en produire de nouvelles.

Cette recherche appartient à l'«IA symbolique»: les méthodes ne s'appuient pas sur des réseaux de neurones, ce sont des programmes manipulant des symboles, des mots, des concepts représentés par des éléments de programmes. Les humains qui les écrivent comprennent le détail de ce qu'ils y mettent et de ce qui se produit quand la machine fonctionne, contrairement aux réseaux de neurones de l'«apprentissage profond», où le système n'explique pas ses réponses. Le lien avec les mathématiques est devenu secondaire dans le projet Cyc, bien qu'un module ait été conçu pour aider les étudiants en mathématiques.

Depuis les succès des approches de type apprentissage profond, par exemple pour le jeu de go, le projet Cyc est regardé avec méfiance. Pourtant, il semble certain que les progrès de l'IA devront associer la capacité de raisonnement et les connaissances générales de systèmes comme Cyc avec des méthodes de type statistique et neuronal.

RECHERCHE DE CONCEPTS

Quelques années après Eurisko, Simon Colton, de l'université d'Édimbourg, a réussi à faire «imaginer» des notions mathématiques nouvelles à son programme, dénommé HR en l'honneur des mathématiciens Godfrey Hardy et Srinivasa Ramanujan, génie ayant découvert

LES NOMBRES REFACTORISABLES

3

Parmi plusieurs idées arithmétiques analogues, celle des nombres «refactorisables» a été proposée par le programme HR de Simon Colton. Un nombre entier n est refactorisable s'il est divisible par le nombre de ses diviseurs. Si p est un nombre premier, alors p^{p-1} est refactorisable, car ses diviseurs sont $1, p, p^2, p^3, \dots, p^{p-1}$, qui sont au nombre de p . Cette propriété arithmétique avait déjà été envisagée indépendamment par d'autres chercheurs, ce qui confirme que c'est une idée mathématique intéressante. Les premiers nombres refactorisables sont : 1, 2, 8, 9, 12, 18, 24, 36, 40, 56, 60, 72, 80, 84, 88, 96, 104, 108, 128, 132, 136, 152, 156, 180, 184, 204, 225, 228, 232, 240, 248, 252, 276, 288, 296, 328, 344, 348, 360, 372...

Voici cinq théorèmes sur les nombres refactorisables, dont les trois derniers ont été découverts par HR :

Théorème 1. Il existe une infinité de nombres refactorisables pairs, et une infinité de nombres refactorisables impairs.

Théorème 2. Tous les nombres impairs refactorisables sont des carrés.

Théorème 3. Un nombre parfait (égal à la somme de ses diviseurs propres, comme $28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$) n'est jamais refactorisable.

Théorème 4. Si n est refactorisable, alors n est de la forme $8k, 8k + 1, 8k + 2$ ou $8k + 4$.

Théorème 5. La somme des diviseurs d'un nombre impair refactorisable est elle-même impaire.

une multitude de formules extraordinaires qui n'ont parfois été démontrées qu'après sa mort.

Le programme HR s'est intéressé à l'arithmétique et a tenté à la fois de créer des concepts nouveaux – des définitions de suites numériques nouvelles –, de formuler des hypothèses à leur sujet et parfois de les démontrer à l'aide de programmes de démonstration automatique qu'il mettait à son service. Le programme disposait de critères pour ne se concentrer que sur des définitions potentiellement intéressantes. Il a pu ainsi identifier 14 suites numériques nouvelles, qui ont été acceptées en 2000 par l'Encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (<http://oeis.org>), où ne figurent que les suites ayant de l'intérêt aux yeux des mathématiciens.

L'une des suites proposées par HR est étonnamment simple et a conduit Simon Colton à publier un article dans le *Journal of Integer Sequences* en 1999. Il s'agit de la suite des «nombres refactorisables». Un entier n est refactorisable s'il est divisible par le nombre de ses diviseurs. L'entier 9 est par exemple refactorisable, car il a 3 diviseurs (1, 3 et 9) et que justement il est divisible par 3. Plus généralement, si p est premier, p^{p-1} est refactorisable.

À vrai dire, cette invention particulière du programme de Colton n'en n'était pas tout à fait une, car après la publication de l'article de 1999, on s'est aperçu qu'un autre article publié en 1990 avait envisagé la même notion... HR n'était donc pas le premier à s'intéresser à la notion, mais cela confirme que l'idée proposée est réellement jugée intéressante par les mathématiciens.

Notons que le programme de Simon Colton a découvert tout seul cette jolie propriété: «Si la somme des diviseurs d'un entier est un nombre premier, alors le nombre de diviseurs de ce nombre est aussi un nombre premier.»

Le programme HR a aussi inventé des notions concernant les groupes, les anneaux finis et les graphes. Il dispose de diverses mesures évaluant l'intérêt d'un concept, se concentre sur le plus prometteur et cherche alors à énoncer des propriétés le concernant pour lesquelles il tente de trouver des démonstrations ou des contre-exemples. Cette façon de procéder est proche de ce que font souvent les chercheurs en mathématiques, mais partiellement car un chercheur prend de la distance vis-à-vis de son sujet et tente d'établir des liens entre concepts appartenant à des champs éloignés.

UN VRAI SUCCÈS SUR LES GRAPHS

Le principe général de HR est particulièrement efficace quand il s'agit de structures finies, car le programme peut disposer d'une liste variée d'exemples et les utiliser pour tester si les propriétés qu'il envisage sont vérifiées par chaque élément de sa base d'exemples. Si c'est le cas, la propriété devient plausible et le système l'envisage comme conjecture. Si l'un des exemples

4

LA MÉTHODE GRAFFITI

Le programme Graffiti énumère et sélectionne des conjectures portant sur les invariants des graphes.

- Le programme considère les invariants $inv_1, inv_2, \dots, inv_n$ et dispose pour chacun d'un sous-programme qui le calcule. Parmi les invariants possibles, il y a le nombre de nœuds du graphe, le nombre maximal de liens d'un nœud du graphe avec les autres nœuds, etc.

- Le programme dispose d'une base de test formée des graphes $G_1, G_2, \dots, G_n$. Cette base peut être complétée au fur et à mesure de l'utilisation du système pour le rendre plus efficace.

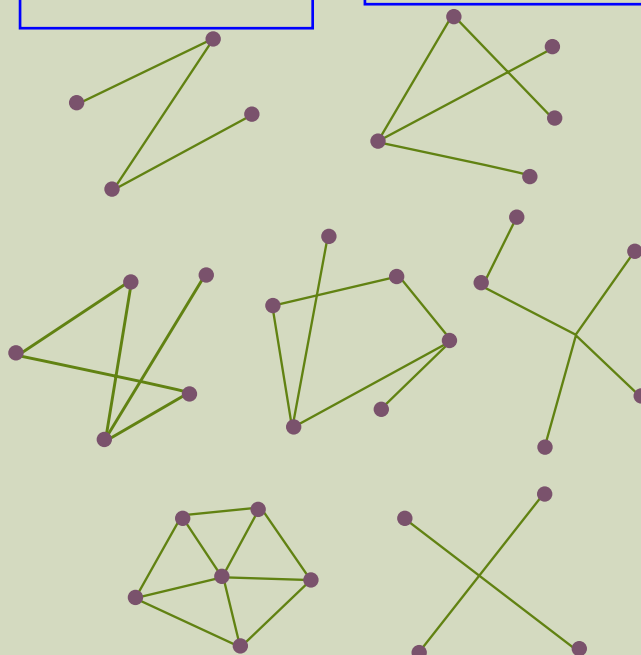
- Le programme dispose d'un système qui énumère les relations algébriques entre invariants. Ce système

engendre par exemple $inv_1 + inv_2 \leq inv_3$, $inv_5/inv_4 > (inv_1)^2$, etc.

Le système donnera la priorité aux relations simples.

- La recherche de conjectures portant sur les invariants consiste alors à tester les relations algébriques énumérées par le système. Celui-ci élimine toute relation non vérifiée par l'un des graphes de la base de test.

- Les relations algébriques passant les tests sont soumises à une seconde série de tests pour déterminer si elles sont connues ou résultent de relations connues. Les relations non écartées sont proposées comme conjectures aux mathématiciens, qui tentent de les démontrer.



Quelques exemples de graphes. Le système Graffiti s'appuie sur une base constituée de nombreux graphes pour tester des relations algébriques entre les «invariants» (nombre de nœuds d'un graphe, nombre moyen d'arêtes entre deux nœuds, etc.).

> contredit la propriété examinée, alors il est certain qu'elle est fausse, et il l'abandonne.

La théorie des graphes se prête bien à cette approche, et c'est pourquoi les méthodes automatiques de recherche de conjectures en théorie des graphes ont donné les premiers exemples incontestables de découvertes mathématiques faites par l'ordinateur.

Le programme Graffiti est la première grande réussite de cette approche. Il a été développé et utilisé de 1984 à 2002 par le mathématicien polonais Siemion Fajtlowicz.

Graffiti s'intéresse particulièrement aux invariants des graphes. Ce sont par exemple le diamètre du graphe (la distance – en nombre d'arêtes – maximale séparant deux nœuds), le nombre chromatique d'un graphe (le nombre minimal de couleurs qu'il faut pour colorer les nœuds du graphe en évitant que deux nœuds voisins soient de même couleur), le degré maximal d'un graphe (nombre maximal de voisins d'un nœud), etc.

Plusieurs dizaines d'invariants sont étudiés et les relations entre ces invariants sont complexes, mais essentielles pour la théorie.

En menant des recherches automatisées de relations entre ces invariants, Graffiti a

proposé de nombreuses conjectures intéressantes. Le programme élimine toutes les conjectures contredites par un des graphes qu'il connaît, et celles classiques ou s'en déduisant facilement. Siemion Fajtlowicz indique d'ailleurs que c'est ce travail de sélection qui a été le plus délicat et complexe à programmer. Parmi les conjectures de Graffiti, certaines ont été démontrées par la suite ou invalidées par des chercheurs de la discipline, donnant lieu à plusieurs publications scientifiques et thèses universitaires.

Il ne fait pas de doute que ce programme et ses successeurs contribuent réellement aux progrès mathématiques. Siemion Fajtlowicz a d'ailleurs été amené à travailler avec les meilleurs spécialistes de la théorie des graphes comme Paul Erdős, Bela Bollobas ou Paul Spencer. Erdős et ses coauteurs, dans un article de 1988 où ils démontrent l'une des conjectures du programme Graffiti, reconnaissent son apport. La conjecture en question affirme que $dm_G \leq r_G$, où dm_G est la distance moyenne entre deux nœuds du graphe G , et r_G est la somme des inverses du nombre de voisins des nœuds de G .

En reprenant le principe de Graffiti, d'autres thèmes de recherche ont été abordés et ont donné lieu à une interaction entre mathématiciens humains et ordinateurs proposant conjectures, réfutations et parfois démonstrations. Aujourd'hui encore, en théorie des graphes et dans certains autres domaines, l'utilisation de générateurs de conjectures aide les chercheurs.

RECHERCHER DES FORMULES

Un événement remarquable s'est produit en 1995 dans le domaine de l'aide informatique à la recherche mathématique. Simon Plouffe a programmé sa machine pour qu'elle explore des formules d'un certain type donnant le nombre π et en a effectivement trouvé une que personne ne soupçonnait. Ici, les objets manipulés ne sont pas finis, puisqu'il s'agit de nombres réels ayant une infinité de décimales. Même si la méthode utilisée pour les conjectures sur les graphes ne s'applique pas, le procédé utilisé lui ressemble.

On se donne plusieurs nombres réels dont on connaît des évaluations aussi précises qu'on le veut ; c'est le cas pour π , et pour les sommes de séries dont le terme général est de la forme $1/[r^*(ak+b)]$. On recherche alors s'il existe une combinaison linéaire à coefficients entiers entre les nombres choisis qui soit nulle avec quelques décimales de précision. C'est un travail patient de calcul impossible à mener à la main, mais pour lequel on dispose d'algorithmes efficaces. Quand une relation est trouvée, on teste si elle reste vraie avec un plus grand nombre de décimales. Là encore, c'est

5

L'ORDINATEUR MATHÉMATICIEN ?

Voici les réponses données en 2014 par de célèbres mathématiciens à la question : « Dans cent ans ou dans mille ans les ordinateurs dépasseront-ils les humains en mathématiques comme ils les dépassent maintenant au jeu d'échecs ? »

Terence Tao (médaillé Fields en 2006) : « Les ordinateurs vont certainement devenir encore plus puissants, mais j'espère que l'essentiel du travail mathématique continuera d'être fait par des humains... utilisant des ordinateurs. »

Richard Taylor (ce professeur à l'université Harvard a aidé Andrew Wiles à démontrer le grand théorème de Fermat) : « Une meilleure question serait : est-ce qu'un ordinateur recevra la médaille Fields ? »

Jacob Lurie (professeur à l'IAS de Princeton) : « Mille ans c'est une durée trop longue pour faire des prévisions. »

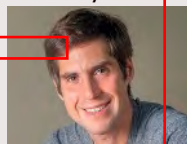
David Ruelle (professeur à l'Institut des hautes études scientifiques) envisage une sorte de passage de témoins de l'homme à la machine pour



Terence Tao



Richard Taylor



Jacob Lurie



David Ruelle



Marcus du Sautoy

faire des mathématiques : « La capacité intellectuelle à faire des mathématiques est un développement récent du point de vue de l'évolution biologique. J'ai du mal à croire que ce développement récent ait produit quelque chose de si unique qu'il ne peut être initié avec succès par les ordinateurs. Je pense plutôt que la créativité mathématique humaine [...] est une étape dans l'évolution, et qu'il y aura d'autres étapes. La grande question devient alors : quel genre de mathématiques pourrait être produit par une créativité mathématique artificielle ? »

Marcus du Sautoy (professeur à Oxford), dans son livre *The Creativity Code* (2019), indique : « Les méthodes d'apprentissage automatique donnent aujourd'hui des résultats décevants en mathématiques. Seront-elles un jour capables de s'appliquer aux mathématiques que nous aimons et d'en créer qui leur ressemblent ? C'est bien possible et l'échec actuel est probablement simplement un sursis. »

une question de calcul. Si la relation est numériquement confirmée, l'algorithme propose la conjecture. En utilisant alors les méthodes classiques, le mathématicien reprend la main et tente de démontrer l'égalité.

C'est ainsi que la formule suivante fut découverte, puis rapidement démontrée:

$$\pi = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{16^k} \left(\frac{4}{8k+1} - \frac{2}{8k+4} - \frac{1}{8k+5} - \frac{1}{8k+6} \right)$$

L'intérêt de cette formule est qu'elle permet de calculer les chiffres binaires de π à un endroit donné du développement binaire, sans avoir à calculer les chiffres qui précèdent. Incontestablement, l'ordinateur avait découvert un résultat intéressant. Grâce à ce type de formules, on connaît aujourd'hui des chiffres binaires de π autour de la position 4×10^{16} alors que les méthodes qui calculent tout ne permettent pour l'instant que d'atteindre la position 3×10^{14} .

TROUVER DES DÉMONSTRATIONS

Un certain nombre de tentatives ont été faites pour introduire dans le domaine des mathématiques des méthodes de nature statistique et neuronale.

Kshitij Bansal et son équipe, au centre de recherche de Google à Mountain View, en Californie, a mis au point un programme, intitulé HOList, pour démontrer des théorèmes en se fondant sur une méthode d'apprentissage. Partant du système d'aide à la formalisation et au contrôle des démonstrations HOL-Light, qui a été utilisé pour la mise au point de la démonstration de la conjecture de Kepler en 2014, les chercheurs ont programmé un outil automatique qui recherche des démonstrations en s'inspirant d'une base de démonstrations fournies en exemples. Le système a eu accès à plus de 10 000 démonstrations de théorèmes, exprimées dans le langage de HOL-Light. Parmi elles de nombreuses démonstrations de résultats intermédiaires de la preuve de la conjecture de Kepler.

Notons que ces démonstrations avaient presque toujours été mises au point par un travail guidé par des mathématiciens. Grâce aux paramètres du réseau de neurones du système HOList, ajustés par des milliers d'exemples, celui-ci sait mieux comment choisir et ordonner les éléments d'une démonstration pour atteindre un but. On lui a resoumis les énoncés des théorèmes ayant servi à son apprentissage, et il a pu retrouver, grâce aux tactiques de démonstration apprises, et cette fois seul sans guidage par des mathématiciens, la démonstration de 58 % d'entre eux. Plus intéressant, quand on lui a soumis 3 217 énoncés pris en dehors des énoncés de la base d'exemples, et qu'on a demandé au système de les démontrer, il a su le faire pour 1 251 d'entre

eux. Mais pour l'instant, le système n'a pas découvert de théorèmes nouveaux.

CALCULER DES PRIMITIVES

Un autre exemple tout récent d'utilisation de l'apprentissage profond concerne le calcul des primitives en analyse et la résolution d'équations différentielles. Certaines méthodes utilisées par les mathématiciens, par exemple l'intégration par parties, ou le changement de variable, sont programmées pour qu'un système réussisse seul des calculs d'intégrales. Beaucoup de travaux ont été ainsi menés conduisant à des programmes de plus en plus complexes et efficaces. En reprenant le problème avec des méthodes d'apprentissage et des réseaux de neurones, Guillaume Lample et François Charton, de Facebook, ont mis au point une méthode différente, fondée sur la présentation d'exemples à un réseau de neurones soigneusement configuré pour apprendre sur ce type de problèmes symboliques.

Les exemples proposés au système étaient de trois types: (1) des paires $[f, F]$, où F est une primitive de f , provenant des programmes de calcul fondés sur l'algorithme de Risch ou une de ses variantes; (2) des paires provenant de dérivation qui, elle, est facile et maîtrisée depuis longtemps, contrairement au calcul de primitives: on dérive F , ce qui donne f , d'où la paire $[f, F]$; (3) des paires exploitant la méthode d'intégration par parties.

Les performances du système obtenu égalent et parfois dépassent celle des systèmes classiques comme Mathematica et Matlab. Cela montre de nouveau que l'association de méthodes purement symboliques (dans la phase d'apprentissage) et de méthodes neuronales fait progresser la solution de problèmes symboliques.

L'HUMAIN RESTE INÉGALÉ

Ainsi, pour certaines tâches spécialisées, les programmes égalent ou battent les humains, mais ces méthodes ont toujours des champs de réussite étroits. Même si, indubitablement, la recherche mathématique en tire une aide, les systèmes conçus aujourd'hui se bloquent et cessent de progresser.

Il est formidable d'avoir développé des systèmes informatiques qui formulent d'hypothétiques relations entre les paramètres des graphes, qui mènent des calculs arithmétiques et en tirent des formules de séries nouvelles, qui effectuent des calculs de primitives ou proposent quelques concepts inattendus par combinaison.

Cependant, tous atteignent vite leurs limites. Au contraire, les mathématiciens bouillonnent d'idées nouvelles que les ordinateurs aident parfois à maîtriser, mais en restant toujours de simples esclaves calculateurs sans véritable créativité. L'ordinateur authentiquement mathématicien n'est pas encore là, on attend sa venue! ■

BIBLIOGRAPHIE

An environment for machine learning of higher-order theorem proving, *Proc. of the 36th International Conference on Machine Learning*, 2019.

G. Lample et F. Charton. **Deep learning for symbolic mathematics**, prépublication arXiv:1912.01412, 2019.

C. E. Larson et N. Van Cleemput. **Automated conjecturing I: Fajtlowicz's Dalmatian heuristic revisited**, *Artificial Intelligence*, vol. 231, pp. 17-38, 2016.

D. B. Lenat et P. J. Durlach. **Reinforcing math knowledge by immersing students in a simulated learning-by-teaching experience**, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 24, pp. 216-250, 2014.

C. E. Larson. **A survey of research in automated mathematical conjecture-making**, *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, vol. 69, pp. 297-316, 2005.

S. Colton. **Automated Theory Formation in Pure Mathematics**, Springer, 2002.

S. Colton. **Refactorable numbers – a machine invention**, *Journal of Integer Sequences*, vol. 2., article 99.1.2, 1999.

L'AUTEUR



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

LA MER... QU'ON VOIT MONTER

Comment se représenter la hausse du niveau des mers?
Deux artistes finlandais ont une solution: des lignes de LED.

Les études se succèdent et les prévisions sont à chaque fois plus alarmantes. Parmi les dernières en date, en octobre 2019, Scott Kulp et Benjamin Strauss, de l'organisation Climate Central, à Princeton, aux États-Unis, montrent que 300 millions de personnes seront exposées aux inondations côtières en 2050; c'est trois fois plus qu'on ne l'imaginait jusque-là. Un mois plus tôt, le Giec dénonçait dans un rapport l'accélération du rythme moyen global de la montée des eaux: depuis 2006, il

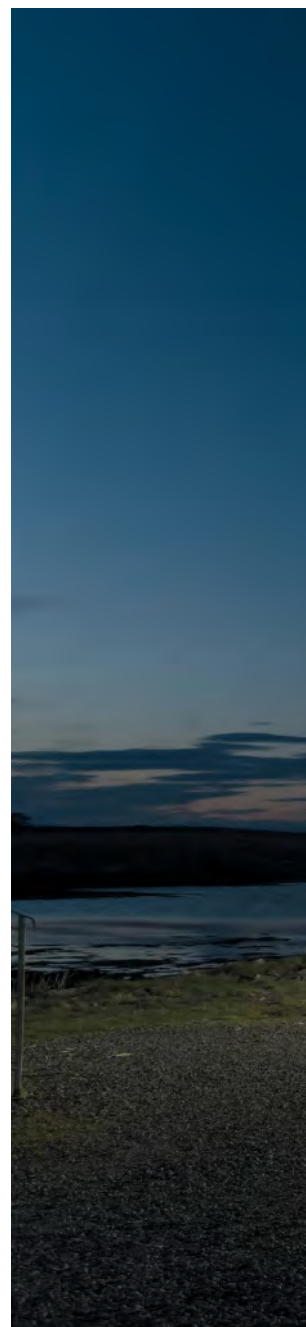
est de 3,6 millimètres par an. Les chiffres se multiplient, mais restent néanmoins abstraits, et même semblent dérisoires, tant il est difficile de se représenter à quoi ils correspondent. Le travail des artistes finlandais Timo Aho et Pekka Niittyvirta peut nous éclairer.

Dans le cadre de l'exposition «Champs Libres» dédiée à la transition écologique, au Maif Social Club, à Paris, ils présentent *Lines* (57° 59' N, 7° 16' W). Ils ont décidé de montrer de façon concrète, et poétique, la réalité de l'élévation du niveau marin en investissant le pourtour du centre des arts Taigh Chearsabhagh, dans le village de Lochmaddy, sur l'île de North Uist, dans l'archipel écossais des Hébrides extérieures. Pourquoi là? L'endroit est apparu «particulièrement pertinent, précise Timo Aho, car il ne peut pas se développer en raison justement de la montée des eaux, mais aussi des tempêtes».

Cette maison de Lochmaddy, en Écosse, ne sera pas épargnée par la hausse du niveau marin, que visualisent des ampoules lumineuses.

L'installation des deux Finlandais consiste en des lignes de LED de basse énergie reliées à des capteurs de marée. Quand elle monte, les ampoules s'allument et, en soulignant les interactions des humains et de la nature, figurent sur la base des données du Giec (le pire scénario) le possible futur niveau des eaux dans la campagne et sur les murs des différents bâtiments. Pas de doute, le paysage sera radicalement transformé et la vie fortement perturbée, la plupart des maisons étant exposées aux inondations. Les risques à venir deviennent palpables et saisissants.

De fait, rappellent les deux artistes «l'art a la capacité de faire passer des idées





complexes, des concepts et des données scientifiques quand on est à court de mots». Et le destin annoncé des deltas densément peuplés d'Asie (Bangladesh, Vietnam...) et des mégaloïles d'Afrique, comme Lagos, Lomé ou Alexandrie, semble soudain moins lointain. D'ailleurs, n'oublions pas qu'en France, Nantes, Bordeaux, Marseille et bien d'autres villes sont tout autant menacées.

Timo Aho et Pekka Niittyvirta ont d'ailleurs récidivé en adaptant leur installation dans un autre endroit tout aussi exposé à la montée des eaux, et nettement moins retiré que Lochmaddy: Miami Beach, aux États-Unis. C'est

qu'aucune région du monde ne sera épargnée: les experts n'excluent pas une élévation du niveau des mers de 2 mètres d'ici à la fin du siècle!

Outre *Lines* (57° 59' N, 7° 16' W), «Champs Libres» expose de nombreuses œuvres qui sont autant de moyens d'expérimenter l'extrême fragilité du vivant et de la planète, mais aussi de penser de nouvelles façons d'agir et de vivre. Par exemple, la Brésilienne Janaina Mello Landini témoigne des interconnexions du vivant et de l'environnement avec *Ciclotrama 126*, une œuvre en cordes ramifiées et organisées selon une structure hiérarchisée, presque fractale,

évoquant les formes des branches d'arbres, des réseaux de veines ou de bronches pulmonaires et... des deltas fluviaux. On y revient, avant qu'ils ne disparaissent sous les eaux. ■

«Champs Libres», jusqu'au 18 juillet 2020.
Maif Social Club, 37 rue de Turenne, 75004 Paris.
<http://bit.ly/MSC-CL>



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

LES AUTEURS



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

LES PETITS BATEAUX DE MARANGONI

Si la surface d'un liquide présente des différences de composition chimique ou de température, des écoulements peuvent y apparaître – par l'effet Marangoni.

Pour échapper à leurs prédateurs, les *Microvelia*, petites punaises de taille millimétrique qui marchent à la surface de l'eau, sont capables d'accélérer quasi instantanément pour atteindre une vitesse de près de 20 centimètres par seconde. Et cette propulsion n'est pas due à leurs pattes, mais à un phénomène physicochimique, l'« effet Marangoni ». Étudié vers 1865 par le physicien italien Carlo Marangoni, cet effet est aussi à l'origine des « larmes » observées dans un verre de vin ou de boisson suffisamment alcoolisée.

Le bateau à savon, expérience bien connue des écoliers, est une autre illustration flagrante de la propulsion par effet Marangoni. Découpons, dans un morceau de carton plastifié (donc non perméable), la forme grossière d'un bateau avec une proue pointue et une poupe dans laquelle nous pratiquons une échancrure (voir l'illustration et l'encadré ci-contre). Posons cet objet sur l'eau calme d'une cuvette ou d'une baignoire, puis versons avec un cure-dent ou une pipette une goutte de savon liquide dans l'échancrure: le bateau se

met à avancer et poursuit son voyage durant plusieurs secondes!

Pour comprendre ce qui se passe, il faut considérer la tension superficielle de l'eau. À cause des forces intermoléculaires qui assurent la cohésion de l'eau liquide, la surface de l'eau se comporte comme une sorte de trampoline: tout se passe comme si elle constituait un film élastique, extensible et tendu.

ACTEUR PRINCIPAL: LA TENSION SUPERFICIELLE

Lorsqu'un objet est posé sur l'eau, ce film exerce sur lui une force tout le long de la ligne de contact entre l'objet et la surface. Habituellement, le liquide est homogène et alors la somme des forces exercées tout le long du contour s'annule dans le plan horizontal: l'objet reste immobile s'il l'était initialement.

Tout change lorsque l'on dépose localement une goutte de savon. Le savon contient des molécules dites « tensioactives », qui ont une « tête » hydrophile et une « queue » hydrophobe: la tête tend à être au contact de l'eau, la queue tend à s'en écarter. Déposée sur l'eau, la goutte de savon s'étale et forme à la surface une

L'effet Marangoni est responsable des larmes de vin et de la propulsion d'un petit bateau en carton à l'arrière duquel on dépose du savon liquide.

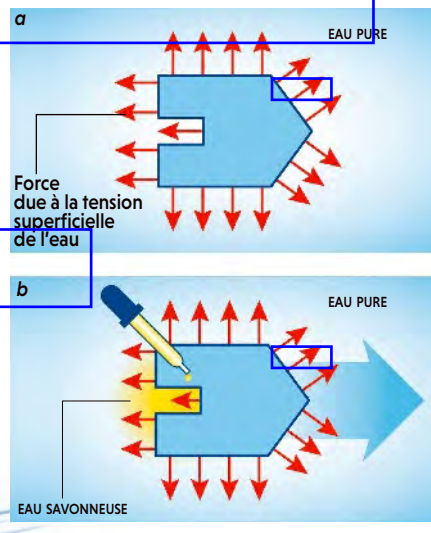
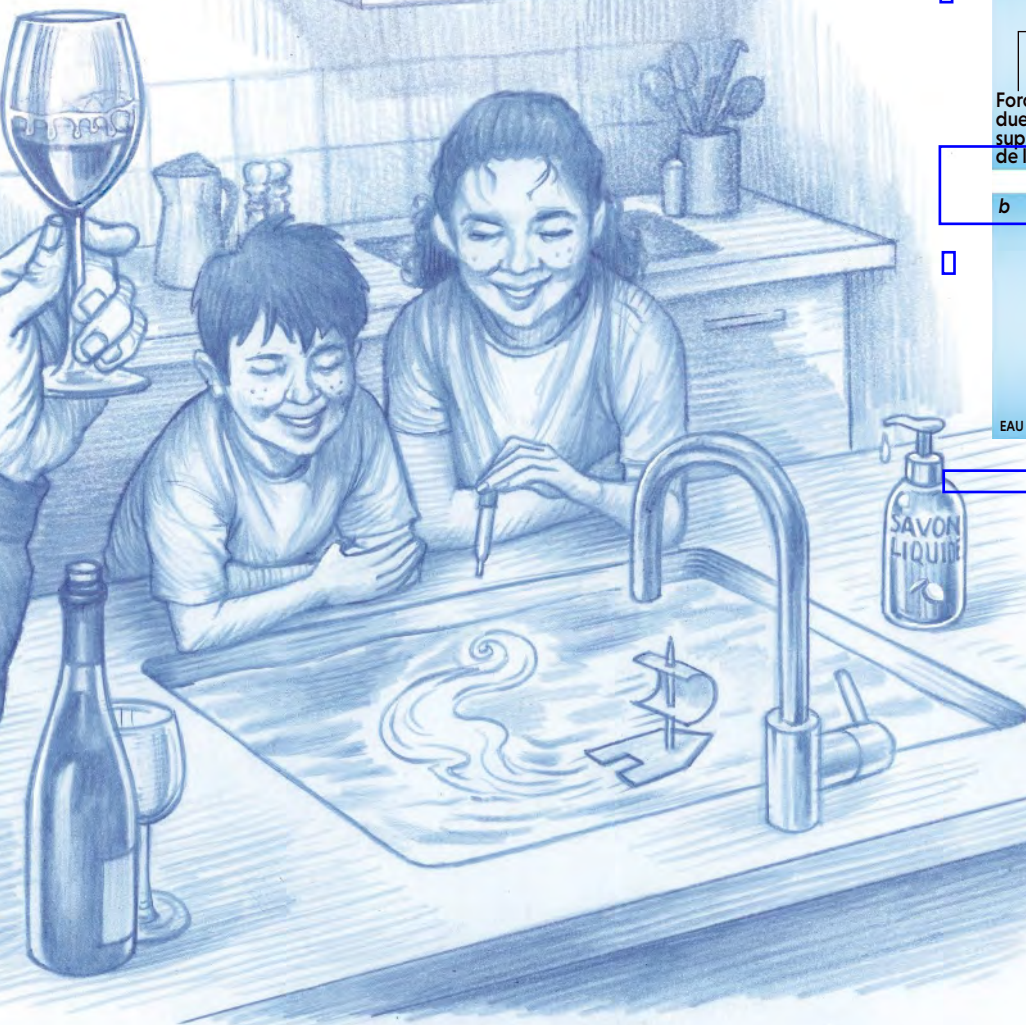
mince couche moléculaire qui en modifie les propriétés. En particulier, cette couche réduit considérablement la tension superficielle, qui peut passer d'environ 70 millinewtons par mètre pour l'eau pure à 25 pour l'eau savonneuse.

Qu'est-ce que cela implique pour le bateau de carton? À l'avant de celui-ci, l'eau est pure et sa tension superficielle tire l'objet. Pour un bateau supposé carré et large de 4 centimètres, la force exercée est d'environ 3 millinewtons. À l'arrière, en revanche, la tension superficielle est



PROPULSION PAR DIFFÉRENCE DE TENSION SUPERFICIELLE

Un petit bateau en carton posé sur l'eau subit, tout au long de son périmètre, des forces de traction (a, flèches rouges) dues à la tension superficielle de l'eau. Ces forces se compensent, de sorte que leur résultante est nulle : le bateau reste immobile. Du savon liquide déposé à l'arrière du bateau a pour effet d'abaisser notablement la tension superficielle à cet endroit (b). Les forces exercées sur le bateau ne se compensent plus, et leur résultante est dirigée vers l'avant : le bateau avance.



fortement réduite – divisée par trois environ – et la force exercée ne compense donc plus la force vers l'avant. La masse d'un morceau de carton de 16 centimètres carrés étant de l'ordre de 1 gramme, l'accélération initiale du bateau est de l'ordre de 2 mètres par seconde carrée.

Cette valeur est déjà appréciable, mais elle serait 10 fois plus élevée, soit le double de l'accélération de la pesanteur, pour un carré de 0,4 centimètre de côté. On comprend donc que certains insectes marchant sur l'eau puissent fuir

rapidement en exploitant ce type de propulsion. Il leur suffit de relâcher depuis leur abdomen une substance, par exemple la sténusine, qui abaisse la tension superficielle de l'eau pour que leur départ soit foudroyant.

DES MOUVEMENTS DU LIQUIDE

Bien que nous ayons considéré un bateau à la surface de l'eau, l'effet sous-jacent est indépendant de la présence d'un objet matériel. Supposons que la surface de notre liquide ne soit plus

homogène, par exemple parce que la température ou la concentration en tensioactifs varie d'un point à l'autre. Quand l'une de ces deux grandeurs augmente, la tension superficielle diminue. Si l'on découpe par la pensée une bande à la surface de ce liquide et que l'on effectue un bilan des forces sur son périmètre, on obtient le >

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



> même résultat qu'avec le bateau: un déséquilibre apparaît et tire la «bande» vers la zone où la tension superficielle est la plus élevée, et ce d'autant plus fort que la différence de tension superficielle est importante.

Cela se traduit donc par un écoulement du liquide des zones de faible tension superficielle – zones les plus chaudes ou les plus concentrées en tensioactifs – vers les zones de tension superficielle élevée, plus froides ou peu concentrées en tensioactifs. C'est cela, à proprement parler, l'effet Marangoni.

Un grand classique des expériences de physique amusantes permet de le voir à l'œuvre. Remplissez un bol d'eau et saupoudrez la surface de poivre; versez au centre une goutte de savon liquide. Les grains de poivre, répartis uniformément à la surface de l'eau, sont alors instantanément chassés à la périphérie.

Dans cette expérience, les grains de poivre visualisent la mise en mouvement du liquide par l'effet Marangoni. Si les grains sont repoussés jusqu'à la périphérie du récipient, ce n'est pas parce qu'ils sont entraînés par le film tensioactif qui s'étale (une couche moléculaire ne peut déplacer un grain mesurant une fraction de millimètre), mais bien par le mouvement rapide de l'eau chassée radialement, par rapport à la goutte de savon, sous l'effet Marangoni.

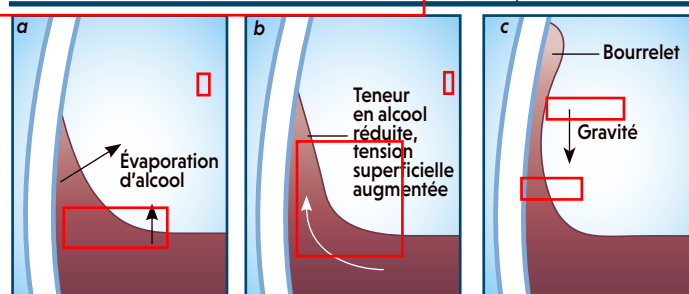
QUAND LE LIQUIDE REMONTE LA PAROI

Revenons aux larmes qui se forment spontanément sur les parois humides d'un verre de vin bien alcoolisé. Comment les expliquer? Une première chose à noter est que le liquide forme sur la paroi du verre un ménisque d'une taille de l'ordre du millimètre, qui résulte d'un équilibre entre forces de capillarité et gravité (voir l'encadré ci-dessus). Par ailleurs, le vin est, pour l'essentiel, un mélange d'eau et d'éthanol, ce qui a deux conséquences. D'une part, la présence de l'éthanol diminue la tension superficielle du mélange, par rapport à l'eau pure. D'autre part, l'éthanol étant plus volatil que l'eau, lorsque le vin s'évapore, les vapeurs sont plus riches en alcool que le liquide.

L'évaporation appauvrit donc le mélange en alcool. L'effet est relativement important dans le ménisque ou dans le film déposé sur la paroi en tournant le vin dans le verre, car le rapport surface/volume y est plus élevé que pour le reste du vin. De plus, l'évaporation abaisse la température du liquide restant,

UN BOURRELET QUI FAIT PLEURER LE VIN

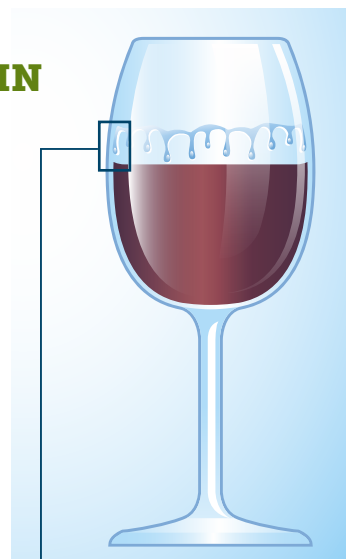
Les larmes de vin sont des coulées que l'on observe sur la paroi du verre, au-dessus du niveau du vin. Elles naissent à intervalles plus ou moins réguliers le long d'un bourrelet liquide. La formation de celui-ci est due à l'effet Marangoni. Au départ, la surface du vin forme, au niveau de la paroi du verre, un ménisque (a). L'alcool du vin s'évaporant, la concentration en éthanol et la température du vin diminuent notablement dans le ménisque (où le rapport surface/volume du liquide est important). Il en résulte une tension superficielle plus élevée qu'à la surface horizontale du vin. Du liquide est ainsi soulevé et la hauteur du ménisque augmente (b), jusqu'à ce que cette ascension soit contrebalancée par le poids du liquide soulevé, d'où le bourrelet (c). La formation des coulées reste, elle, imparfaitement comprise.



cette diminution étant, encore une fois, plus ou moins importante selon le rapport surface/volume. Par conséquent, le ménisque et le film ont une teneur en alcool plus faible et une température plus basse que le reste du vin. La tension superficielle y est donc plus élevée.

La variation de tension superficielle, depuis la surface libre du vin jusqu'en haut du ménisque, crée un écoulement de liquide dirigé vers les parois et vers le haut. Le liquide grimpe le long du verre, jusqu'à ce que le poids du liquide soulevé compense la force qui le tire vers le haut. Un bourrelet liquide se forme alors à un ou deux centimètres au-dessus de la surface du vin.

À partir de ce bourrelet, du liquide redescend sous la forme de «larmes». Les raisons précises de ce ruissellement? Depuis 1992, date des travaux pionniers sur les larmes du vin de Jean-Baptiste Fournier et Anne-Marie Cazabat, au Collège de France, elles sont toujours débattues... Une interprétation très récente, proposée fin 2019, fait ainsi intervenir des ondes de choc au sein du film mouillant. ■



BIBLIOGRAPHIE

D. Ivanov et S. Nikolov, *Molecular engine boat*, *Physics Education*, vol. 54(4), article 045006, 2019.

Y. Dukler et al., *A theory for undercompressive shocks in tears of wine*, prépublication arXiv :1909.09898, 2019.

J. B. Fournier et A. M. Cazabat, *Tears of wine*, *Europhysics Letters*, vol. 20(6), pp. 517-522, 1992.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

7 dossiers rédigés par des chercheurs
et des experts sur le sujet

Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques.
Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles
publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'AUTEUR



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

LES FÉLINS, ROIS DE L'HYBRIDATION

Ligres, tigrons, jaglions, léoguars... Et si ces étranges fauves nés de croisements entre différentes espèces de félins détenaient les clés de la curieuse histoire évolutive de cette famille?

Imposants comme le tigre ou le lion, rapides comme le guépard, discrets comme la panthère des neiges ou familiers comme le chat domestique : la famille des félinés (ou félins) rassemble les carnivores les plus renommés. À l'état naturel, on les trouve sur tous les continents, sauf l'Antarctique et l'Australie. On pourrait penser que l'histoire évolutive d'animaux aussi médiatiques est parfaitement connue des biologistes. Pourtant, il n'en est rien, et plusieurs études récentes ont révélé pourquoi cette histoire est un réel casse-tête.

Si au XIX^e siècle les zoologistes avaient eu bien du mal à classer les félins à partir de leurs caractéristiques anatomiques, on pensait que les phylogénies moléculaires – les constructions d'arbres de parenté fondés sur l'étude des génomes – amèneraient rapidement la solution. C'est ainsi qu'il y a quinze ans, l'équipe de Stephen O'Brien, à l'Institut américain du cancer, à Frederick, dans le Maryland, a publié une phylogénie consensuelle. Huit clades distincts se seraient diversifiés à la fin du Miocène (il y a moins de 11 millions d'années) et auraient étendu leurs territoires à partir d'un centre situé en Eurasie. Toutefois, les auteurs ont exposé leurs résultats avec grandes précautions, expliquant que l'ADN issu des mitochondries (les compartiments qui fournissent de

l'énergie aux cellules), celui des chromosomes sexuels et celui des autres chromosomes donnaient parfois des résultats contradictoires. Des incohérences apparaissaient à certains endroits de l'arbre phylogénétique, dues sans doute à des processus génétiques complexes.

Il est vrai que, depuis longtemps, zoologistes et généticiens s'interrogent sur certaines originalités des félins. Ainsi, le tigre et le lion, bien que reconnus comme des espèces distinctes, sont interfertiles et ont donné naissance, dans des zoos, à des tigrons (hybrides entre une lionne et un tigre) ou des ligres (hybrides entre une tigresse et un lion), eux-mêmes fertiles quand ils sont femelles. La seule barrière de reproduction est la séparation des territoires et la différence de comportement.

D'ÉTRANGES GÉNOMES

Il y a deux ans, une équipe internationale autour de William Murphy, de l'université du Texas, et d'Eduardo Elzirik, de la faculté des sciences de Porto Alegre, au Brésil, a utilisé les génomes nouvellement séquencés de la panthère (ou léopard, *Panthera pardus*) et du jaguar (*P. onca*) pour tenter de comprendre les problèmes évolutifs du clade correspondant au genre *Panthera* et comprenant cinq grands félins : la panthère, le jaguar,



Si les ligres mâles sont stériles, les ligresses sont souvent fertiles.



Hervé Le Guyader
a notamment publié :
**Biodiversité :
le pari de l'espoir,**
(Le Pommier, 2020).

EN CHIFFRES

41

Ce ligre, jeune fauve hybride, est né de l'union d'une tigresse et d'un lion en captivité.

C'est le nombre d'espèces de félidés modernes.

3,6 MÈTRES

Les félins les plus grands sont des ligres: Hercule, un ligre américain, mesure 3,6 mètres et pèse 410 kilogrammes. Le tigre de Sibérie, lui, ne mesure « que » 3,3 mètres pour 300 kilogrammes...

242

Dans les génomes du clade lion + panthère + jaguar, 242 fenêtres de 100 kilobases correspondent à des échanges de gènes lors d'hybridations.



le lion (*P. leo*), le tigre (*P. tigris*) et la panthère des neiges (*P. uncia*).

Le séquençage quasi complet de ces cinq génomes (auxquels on ajoute celui du chat domestique pour comparaison) semble être le gage de l'obtention d'une phylogénie fiable. Mais, vu les remarques de l'équipe de Stephen O'Brien à laquelle appartenait William Murphy, les différents arbres ont été construits en utilisant soit les génomes totaux, soit seulement le chromosome X, le chromosome Y ou l'ADN mitochondrial. Comme prévu, des discordances apparaissent entre les phylogénies résultantes. Mais comment savoir quel arbre est le plus proche de la réalité?

Les chercheurs ont utilisé une astuce qui consiste à faire glisser sur les séquences d'ADN une fenêtre de 100 kilobases et de réaliser à chaque fois un arbre. Une même topologie est retrouvée largement majoritaire, tandis que les autres topologies correspondent à des fenêtres situées à des endroits précis des chromosomes. Ainsi, la position du jaguar dans l'arbre peut changer, le couple lion + jaguar remplaçant parfois lion + panthère, signe que de telles régions n'ont pas la même histoire que le reste du chromosome. Il y a donc eu apport secondaire de matériel génétique qui brouille le message.

Les génomiciens ont alors recherché systématiquement de tels motifs et ont mis ➤



Ligre
Taille: 3 à 3,6 m

De tels hybrides sont rares dans la nature: les différences de comportement et la séparation des territoires suffisent à créer une barrière de reproduction.

> en évidence un réseau complexe d'hybridations ancestrales dans le genre *Panthera*, comme celle entre un ancêtre de la panthère des neiges et l'ancêtre du couple lion + panthère (voir l'encadré ci-contre). De tels résultats sont essentiels pour reconstruire la biogéographie des ancêtres car, pour qu'il y ait échange, il faut que les animaux aient vécu sur des territoires proches.

Dans le clade lion + panthère + jaguar, parmi les fenêtres intéressantes, 43 d'entre elles correspondent à des gènes sélectionnés positivement, relatifs à la morphologie, la stature, le cerveau, le développement, la pigmentation et la perception sensorielle, ce qui suggère que des hybridations ancestrales ont pu favoriser la sélection de ces gènes. Chez le jaguar, notamment, les gènes *ESRP1* et *SSTR4* semblent clés. D'une part, ils portent une mutation propre à cet animal et des signes de sélection. D'autre part, ils sont impliqués dans le développement crâniofacial et expliqueraient pourquoi le jaguar est caractérisé par une tête massive et une mâchoire extraordinairement puissante : à la fin du Pléistocène, avec l'extinction de ses proies habituelles – de grands mammifères –, le fauve a dû se rabattre sur des reptiles coriaces comme les caïmans ou les tortues d'eau douce. Ce changement de régime aurait sélectionné des variants des gènes facilitant le broyage des nouvelles proies. Et une hybridation concomitante aurait favorisé le processus.

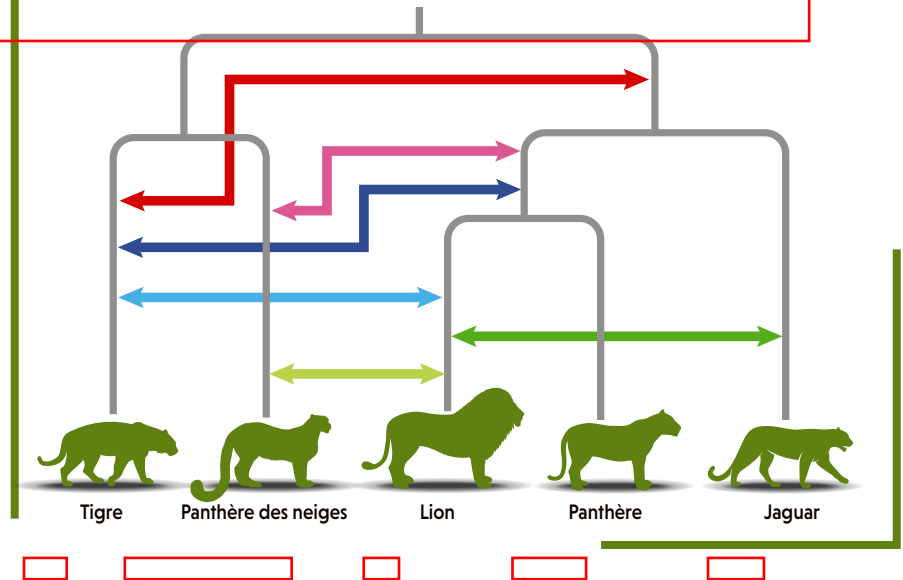
VERS UNE HISTOIRE PLUS COHÉRENTE DES FÉLIDÉS

En 2019, l'équipe de William Murphy a appliqué à l'ensemble des félinidés la démarche mise au point lors de l'étude du genre *Panthera*. L'idée forte de ce travail a consisté à séparer de façon systématique les séquences suivant leurs taux de recombinaison. Les régions à taux élevé, c'est-à-dire là où majoritairement on trouve des apports de gènes par hybridation, ont donné des phylogénies à histoires évolutives distordues. *A contrario*, les régions à bas taux ont permis de reconstruire des arbres cohérents dont les branchements présentaient des dates en accord avec les données paléontologiques, alors que l'équipe de Stephen O'Brien avait obtenu des discordances.

Les félinidés se structurent toujours en huit clades, chacun étant caractérisé par un animal emblématique – le chat domestique (*Felis silvestris catus*), le chat-léopard (*Prionailurus bengalensis*), le puma (*Puma concolor*), le lynx boréal (*Lynx lynx*), l'ocelot (*Leopardus pardalis*), le chat

UN ARBRE TRÈS ENTRECROISÉ

En 2017, une équipe internationale a construit un arbre phylogénétique des cinq espèces de grands félins, qui prenait en compte les traces d'hybridation détectées dans leurs génomes. Outre le fait que ce nouvel arbre diffère du précédent, qui rassemblait lions et jaguars, il témoigne de nombreuses hybridations (flèches) entre cousins pas toujours proches, comme un ancêtre de la panthère des neiges et l'ancêtre du couple lion + panthère (flèche rose).



de Temminck (*Catopuma temminckii*), le caracal (*Caracal caracal*) et la panthère (*Panthera pardus*).

La mise en évidence des flux de gènes intraclades a résolu plusieurs discordances phylogéographiques, comme celle des lynx pardelle et boréal. D'après les dates précédemment obtenues, ces animaux se seraient hybridés alors qu'ils vivaient sur des territoires séparés, ce qui n'est plus le cas avec les nouvelles dates. Les génomiciens ont par ailleurs mis en évidence des hybridations interclades, et même entre ancêtres de ces clades. La prise en compte de tous ces artefacts entraîne que la plupart des diversifications des clades sont maintenant plus récentes que dans l'arbre de Stephen O'Brien, tandis que les branchements les plus profonds sont devenus plus anciens. Ainsi, le clade du chat domestique se diversifie à 3,5 millions d'années au lieu de 5 millions. En revanche, l'ancêtre des félinidés est maintenant daté à 14,5 millions d'années, au lieu des 11 millions d'années inférées précédemment.

Ainsi, les systématiciens ont désormais tous les outils pour reconstruire l'histoire des félinidés avec une précision insoupçonnée il y a encore une dizaine d'années. Quant aux ligres et tigrons, ils ne sont finalement que des exemples actuels de l'étonnante capacité des félins à s'interféconder, qui a sans doute plusieurs fois contribué à leur survie...

BIBLIOGRAPHIE

G. Li et al., **Recombination-aware phylogenomics reveals the structured genomic landscape of hybridizing cat species**, *Mol. Biol. Evol.*, vol. 36(10), pp. 2111-2126, 2019.

H. V. Figueiró et al., **Genome-wide signatures of complex introgression and adaptive evolution in the big cats**, *Sci. Adv.*, vol. 3, e1700299, 2017.

W. E. Johnson et al., **The late Miocene radiation of modern Felidae: A genetic assessment**, *Science*, vol. 311, pp. 73-77, 2006.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA

SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIERFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
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 pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29 %
de réduction *31 %
de réduction *43 %
de réduction *

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: pouirlascience@abopress.fr

PAG20STD

OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisais 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:

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

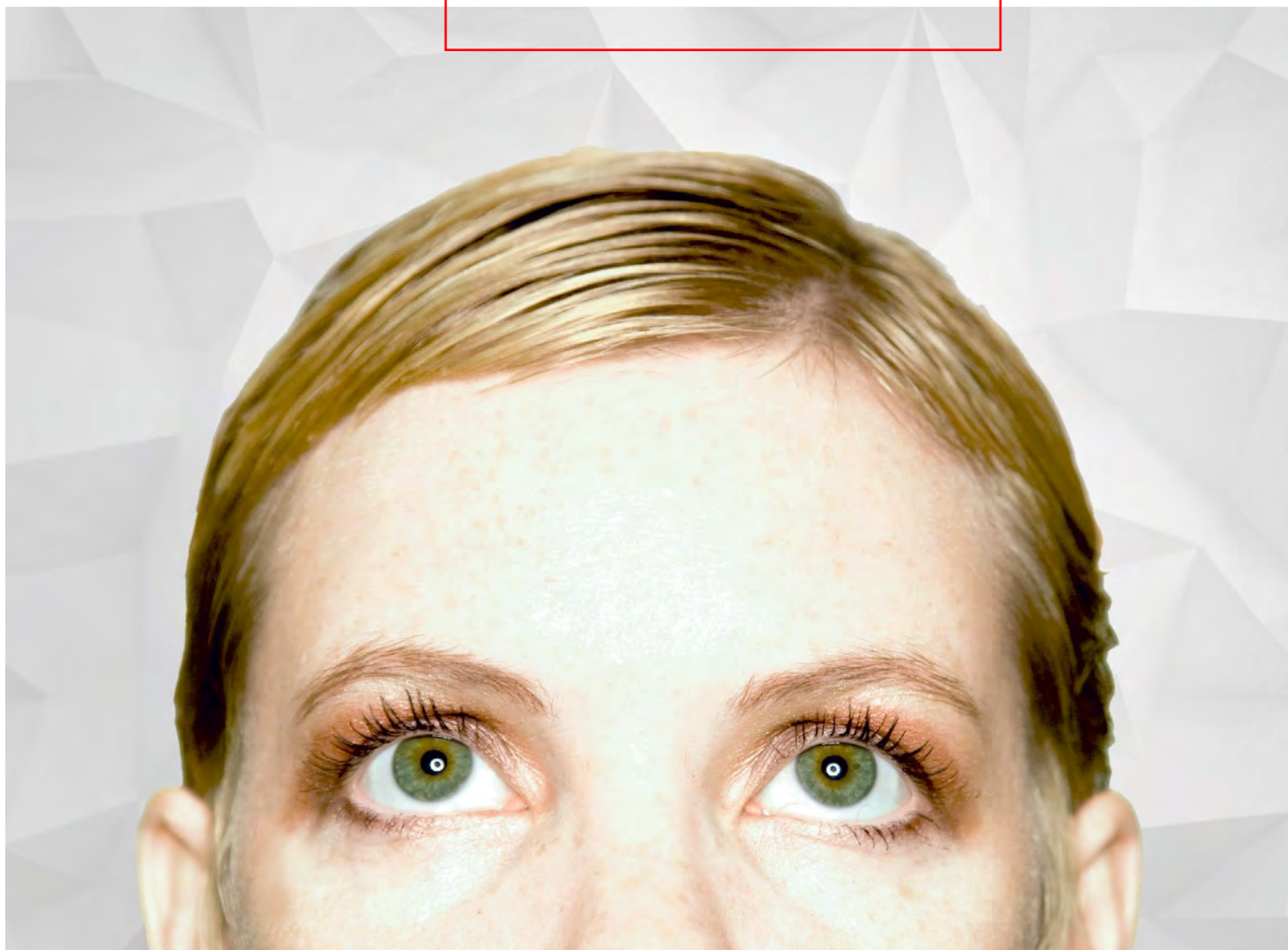
☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€
Au lieu de 82,80€☐ FORMULE PAPIER
+ HORS-SÉRIE• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier79€
Au lieu de 114,40€☐ FORMULE
INTÉGRALE• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne99€
Au lieu de 174,40€

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.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@pouirlascience.fr.



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Partenaires

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

SCIENCE POUR LA

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de gastronomie
moléculaire AgroParisTech-
Inra, à Paris

DES DÉRIVÉS DE L'AIL DANS LE LAIT MATERNEL

**Le fœtus et le nourrisson ingèrent des composés
provenant de l'alimentation de la mère...
mais aussi des dérivés produits par celle-ci.**

Comment l'alimentation de la femme enceinte détermine-t-elle celle du fœtus, puis celle de l'enfant allaité? Des composés maternels traversent-ils la barrière placentaire, dans le premier cas, et d'autres arrivent-ils dans le lait, dans le second? Et retrouve-t-on les composés initiaux des aliments, ou bien leurs métabolites?

Des études de comportements ont établi que la consommation d'alcool par les mères modifie l'odeur du lait et le sommeil des enfants, avec des risques sur leur développement. Autre exemple: la consommation de vanille conduit à des tétées plus longues, durant lesquelles les enfants boivent davantage de lait.

Traquer les effets des aliments dans le lait maternel est difficile, car l'organisme maternel modifie les composés qu'il absorbe. Les biochimistes ont établi que le tabac, l'alcool, l'ail, la carotte, l'ail des ours et d'autres ingrédients modifient l'odeur du lait, et ont identifié des composés responsables de ces odeurs, tels que la carvone (dans le fenugrec, le carvi), le menthol (dans la menthe), l'anéthol (dans l'anis, le fenouil...), l'eucalyptol (dans la menthe). En revanche, on n'a pas trouvé de transfert de composés odorants pour l'huile de poisson, par exemple.

La question intéresse évidemment la médecine, car certains métabolites de composés abondants dans les aliments peuvent être bénéfiques ou toxiques pour le nourrisson. Par exemple, les composés de l'ail ont des effets anticarcinogènes, antimicrobiens et antifongiques, et l'ail réduit l'incidence des maladies cardiovasculaires chez la mère.

On retrouve dans le lait maternel des dérivés (d'ail par exemple) que le corps maternel produit à partir des composés de son alimentation.

L'allicine de l'ail, l'un de ses composés actifs, se retrouve-t-elle dans le lait maternel? Elle est produite par une enzyme nommée alliinase à partir de l'alliine, un acide aminé. Dans l'ail intact, l'alliine et l'alliinase sont dans des compartiments cellulaires différents, de sorte que l'allicine n'est pas présente. En revanche, quand les structures végétales sont dégradées, par mastication ou découpe, l'allicine se forme et se dégrade en composés qui contribuent à l'odeur de l'ail et sont responsables de ses effets biologiques.

Andrea Buettner et ses collègues, à l'université d'Erlangen, en Allemagne, avaient identifié trois de ces dérivés dans le lait: le 3-(méthylthio)-1-propène, le 3-(méthylsulfinyl)-1-propène et le 3-(méthylsulfonyl)-1-propène. Récemment, les biochimistes allemands ont dosé ces composés dans les laits de 12 mères qui avaient été invitées à noter tout ce qu'elles avaient mangé et à utiliser, ou au contraire à éviter, des ingrédients particuliers (ail, oignon, chou, cive...). Le troisième jour du régime qui leur était prescrit, certaines seulement consommaient de l'ail cru (3 grammes environ).

L'étude a établi que la concentration de ces métabolites odorants dans le lait est maximale entre une et trois heures et demie après l'ingestion d'ail cru, mais qu'on retrouve ces composés dans le lait maternel plus de dix heures après. Les mécanismes des transferts, assortis des

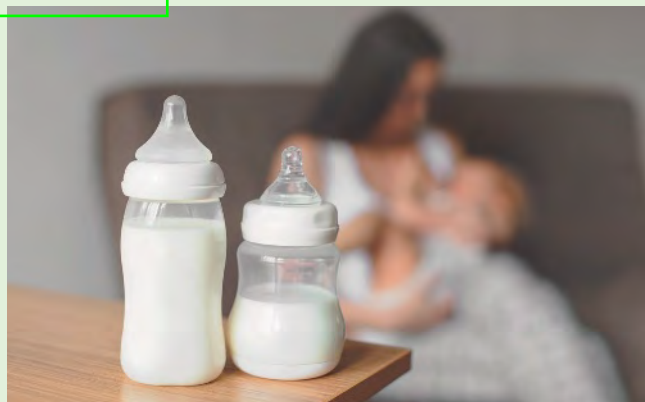
modifications moléculaires, de l'aliment au lait, restent à étudier plus avant.

Il reste que, pour le cuisinier, le lait (non maternel...) est un ingrédient précieux. Dans cette émulsion d'une phase grasse dispersée dans une solution aqueuse, avec tous les tensioactifs nécessaires, les composés sapides et odorants se dissolvent à merveille, d'où de multiples décoctions, infusions ou macérations possibles – comme l'indique la recette ci-dessous. ■



LA RECETTE DE L'AIL À TOUTES LES SAUCES

- 1 Faire macérer, pendant deux jours et au réfrigérateur, 3 gousses d'ail pelées dans 100 g de lait.
- 2 Faire une décoction en cuisant pendant 30 minutes, à couvert, 3 gousses d'ail (pelées) dans 100 g de lait.
- 3 Faire une macération enzymatiquement modifiée en broyant de l'ail au mortier, puis en stockant la pâte formée dans 100 g de lait.
- 4 Faire une décoction enzymatiquement modifiée en broyant de l'ail, puis en chauffant la pâte formée dans du lait, à couvert.
- 5 Porter à ébullition 1 litre d'eau avec 10 gousses d'ail, jeter l'eau. Remettre de l'eau et répéter l'opération 5 fois. Broyer ensuite l'ail avec du lait et 2 pommes de terre cuites pour faire une pâte au goût très doux.
- 6 Servir un filet de poisson accompagné de ces diverses préparations aillées.



A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.58

SKYGLOW

Ce halo créé par la lumière des agglomérations est visible dans le ciel jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines, de kilomètres.

P.48

PALLIUM

Cette région du cerveau contient le cortex, siège des aptitudes cognitives de haut niveau. Chez les oiseaux, on pensait que le pallium n'occupait qu'une petite zone cérébrale. Il s'est révélé sous-estimé, et même relativement comparable à celui des mammifères. Et si « cervelle d'oiseau » était en fait un compliment ?

P.36

« Si le désaccord sur la constante de Hubble persiste, il faudra repenser les modèles. Nous avons même déjà trop de pistes : nous avons une serrure, mais toutes les clés fonctionnent... »

FRÉDÉRIC COURBIN
astrophysicien à l'EPFL, en Suisse

P.16

6,5

C'est, en milliards de kilomètres, la distance moyenne entre la Terre et Arrokoth, un corps de la ceinture de Kuiper que la sonde New Horizons, de la Nasa, a survolé le 1^{er} janvier 2019.

P.17

DÉSAMBIGÜISATION

En linguistique, la désambiguïsation lexicale est la détermination du sens précis d'un mot à partir du contexte dans lequel il est utilisé. Souvent élémentaire pour un humain, cet exercice est très difficile à faire réaliser par un programme informatique, mais des progrès récents dans l'entraînement des réseaux de neurones semblent relativiser cette supériorité.

P.80

LARMES DE VIN

Sur les parois d'un verre, on observe des coulées – les fameuses larmes – le long d'un bourrelet au-dessus du vin. Sous l'effet de l'évaporation inhomogène de l'alcool contenu dans le vin, la tension de surface, plus forte près des parois, entraîne du liquide vers le haut et forme le bourrelet.

P.22

18 000

C'est le nombre de pages, réparties en 17 volumes, que contenait l'encyclopédie de Diderot. Malgré cette taille, les entrées de l'ouvrage étaient très restreintes en longueur et en nombre (71 818), comparé à celles des encyclopédies en ligne comme Wikipédia (plus de 2 millions en français).



Tous les enfants
font des rêves
mais pour certains
c'est vital de les réaliser.

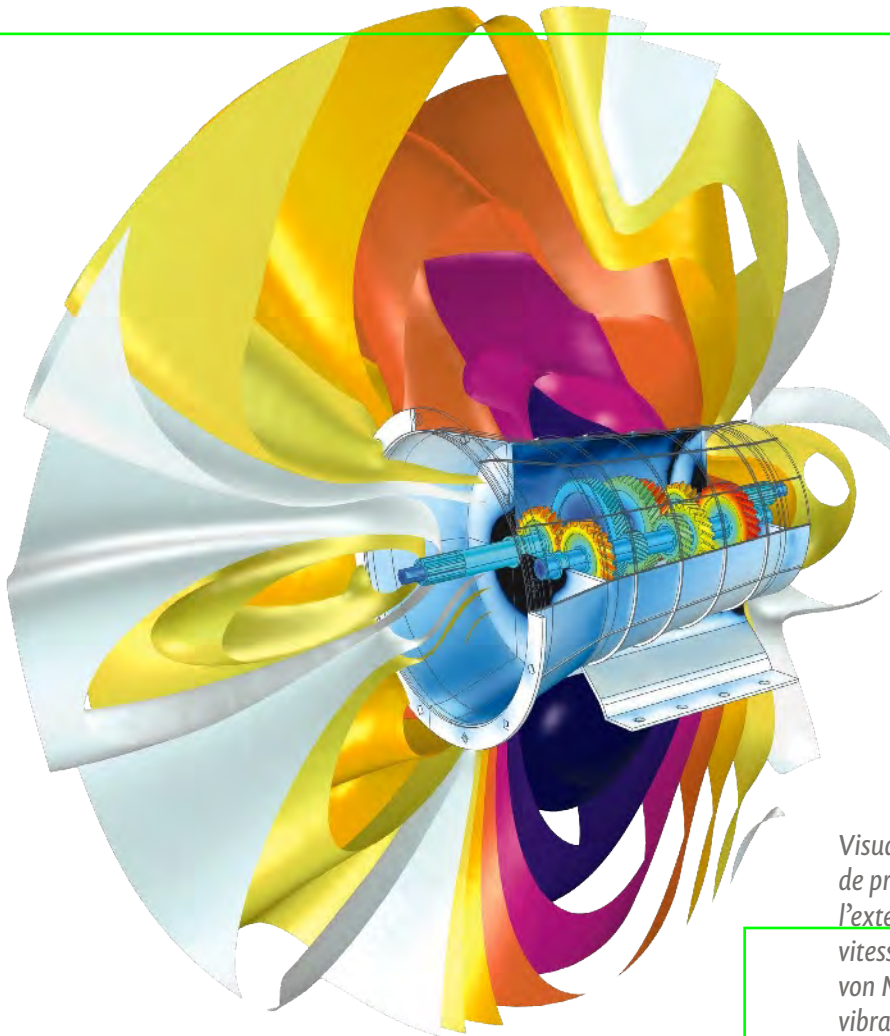
*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.*

*Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation