ART ET SCIENCE
Les plus beaux vélins du Muséum de Paris

BIOLOGIE
Les mystères de la division cellulaire

TECHNOLOGIE
Des voix artificielles presque parfaites

POUR LA
SCIENCE

Décembre 2016 - n° 470

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'endroit le plus vide du cosmos

Un désert de 2 milliards d'années-lumière

M 02687 - 470 - F: 6,50 € - RD

30
30 ans
Cité
cité
des sciences & de l'industrie
>EXPO<
11.10.16
06.08.17
QUOI
DE NEUF
AU MOYEN ÂGE ?
TOUT CE QUE L'ARCHÉOLOGIE NOUS RÉVÈLE
Porte de la Villette
En partenariat avec
Coproduit avec
Institut national de recherches archéologiques préventives
Inrap

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr
8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Joubl
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Olivier Boucher, Benoît Famaey, Capucine Jahan, Jean-Jacques Perrier, Christophe Pichon, Daniel da Rocha, Marc-André Selosse, Virginie Tissières

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05
PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science
19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
Pour la Science,
528 avenue du grain d'or, 41350 Vineuil
pourlasciencevpc@daudin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64
DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Abîme astronomique

Regardez un ciel nocturne bien noir, si vous avez la chance d'en avoir un. Vous remarquerez que, paradoxalement, il est loin d'être noir : il fourmille d'étoiles et d'autres objets astronomiques plus ou moins lumineux. Passée l'émotion ressentie devant l'immensité du cosmos rendue ainsi tangible, vous vous demanderez peut-être si la répartition des astres dans l'Univers obéit à une certaine régularité.

Pour répondre correctement à cette question, il faut s'affranchir des particularités locales et prendre de la distance… cosmologique ! À des échelles de plusieurs centaines de millions d'années-lumière, l'Univers est-il à peu près homogène comme le supposent les modèles cosmologiques les plus simples ? Pas vraiment : les scientifiques ont mis en évidence des régions relativement denses et d'autres

À 3 milliards d'années-lumière de la Terre, un immense désert cosmique

relativement dépeuplées en galaxies. Qui plus est, comme nous l'explique l'astrophysicien Istvan Szapudi *(voir pages 24 à 31)*, plusieurs études récentes indiquent l'existence d'un « supervide » à une distance de 3 milliards d'années-lumière de nous : une immense région désertique dont le diamètre s'étend sur près de 2 milliards d'années-lumière.

Régions vides ou pas, qu'est-ce que cela change, au-delà de la géographie du cosmos ? En fait, les grands déserts cosmiques sont intimement liés à plusieurs questions portant sur les débuts de l'Univers, sur son expansion et sur les théories de la gravitation, dont la relativité générale d'Einstein. En particulier, le supervide détecté est susceptible d'expliquer une zone froide figurant dans la carte du rayonnement émis par l'Univers 380 000 ans après le Big Bang. Et l'étude des autres déserts cosmiques mettra bientôt à l'épreuve des modèles de l'énergie sombre, cette mystérieuse entité censée accélérer l'expansion de l'Univers *(voir pages 32 et 33)*. Les vides ne sont pas rien, loin s'en faut ! ■

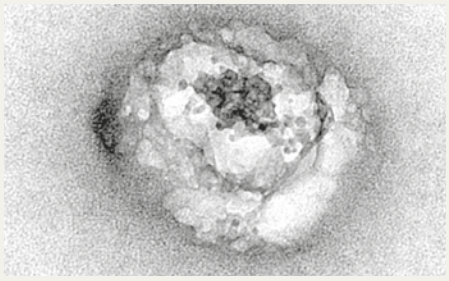
sommaire

3 Edito

Actualités

5 La formation des aérosols à la loupe de Cloud

7 Le virus de l'hépatite C se dévoile enfin



8 Les galaxies spirales défient la matière noire

9 Comment les plantes repèrent la verticale

14 Du microbiote intestinal aux maladies neurodégénératives

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

16 Entretien
Enseignement : « Il faut donner du sens aux nombres dès la maternelle »
Stella Baruk

20 Homo sapiens informaticus
L'achat hors-ligne bientôt une activité de luxe !
Gilles Dowek

22 Cabinet de curiosités sociologiques
Des énigmes pas si anodines
Gérald Bronner

Le numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage. En couverture : © Kenn Brown/Mondolithic Studio

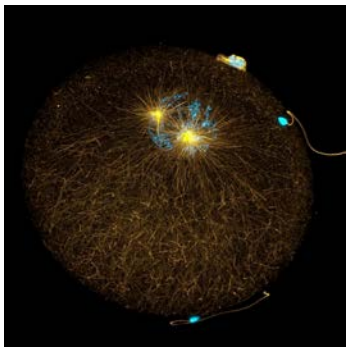
À LA UNE

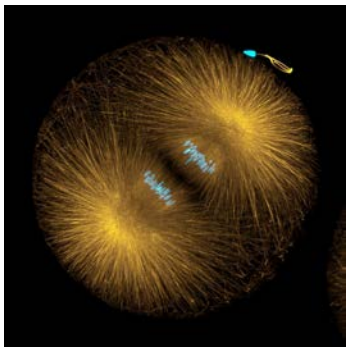
24 ASTROPHYSIQUE
L'endroit le plus vide de l'Univers
István Szapudi
En cherchant à expliquer pourquoi une zone de l'Univers est anormalement froide, des astrophysiciens ont découvert une vaste région où la matière se fait rare.

32 COSMOLOGIE
« Avec les vides cosmiques, nous testerons bientôt divers modèles d'énergie sombre »
Entretien avec Stéphanie Escoffier
Les régions les plus vides de l'Univers cachent de nombreuses informations sur l'évolution du cosmos et sur l'énergie sombre. Ainsi, les catalogues de galaxies les plus récents commencent à ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

36 PSYCHOLOGIE
La fraude scientifique, un symptôme du fonctionnement de la science
Olivier Klein et Vincent Yzerbyt
Le nombre des fraudes scientifiques s'accroît depuis quelques décennies. Les raisons sont multiples et tiennent aussi bien à des individus peu scrupuleux qu'au fonctionnement du système de recherche.

44 BIOLOGIE CELLULAIRE
Mécanique de la cellule et œuf mollet
Agathe Chaigne
Ni trop dur ni trop mou : tel est le secret de l'ovocyte, la cellule sexuelle femelle. Alors seulement, il se divisera de façon asymétrique, optimisant ainsi les chances de survie de l'embryon qu'il deviendra peut-être.





54 TECHNOLOGIE
Des voix de synthèse presque humaines
Nicolas Obin et Axel Roebel
La parole n'est plus le privilège des humains. Aujourd'hui, grâce aux avancées scientifiques et techniques, la voix donnée aux machines peut imiter à la quasi-perfection celle d'une personne réelle.

64 PORTFOLIO
Les précieux vélins du Muséum
Cécile Lestienne
Pour le plaisir des yeux, une exposition inhabituelle et un livre magnifique offrent l'occasion de découvrir trois siècles d'illustration naturaliste à travers la singulière collection de vélins du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Rendez-vous

76 Logique & calcul
Formes et ensembles autopavables
Jean-Paul Delahaye
Un miracle géométrique : avec des copies de chaque forme d'un ensemble autopavable, on reconstitue chacune des formes en plus grand

84 Science & fiction
Peut-on estimer la biodiversité extraterrestre ?
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

87 Idées de physique
La merveilleuse langue du caméléon
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

90 Question aux experts
Les sols se renouvellent-ils ?
Jean-Paul Legros

92 Science & gastronomie
Un retour en grâce des matières grasses
Hervé This

94 A lire

98 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE 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

Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

La formation des aérosols à la loupe de Cloud

Grâce à l'expérience Cloud *et à un modèle global de formation des aérosols atmosphériques, éléments précurseurs des nuages, une équipe de chercheurs a écarté définitivement le rôle des rayons cosmiques dans le réchauffement climatique.*

Vue de l'intérieur de l'enceinte de l'expérience *Cloud*, qui simule les conditions atmosphériques. Grâce à ce dispositif, les chercheurs étudient la formation des aérosols.

Les nuages sont un élément clé des modèles climatiques, car ils réfléchissent une partie du rayonnement et limitent ainsi la quantité d'énergie qui parvient au sol ou s'échappe de la Terre. Cependant, dans le contexte de l'activité anthropique et du changement climatique, leur rôle est à préciser. Il est notamment important de comprendre la formation de leurs précurseurs : les aérosols, des particules nanométriques et micrométriques présentes dans l'atmosphère et autour desquelles la vapeur d'eau se condense. Or Eimear Dunne, de l'université de Leeds, et ses collègues ont élaboré un modèle global physicochimique des aérosols en intégrant les résultats les plus récents de l'expérience *Cloud* au Cern, près de Genève.

L'objectif de cette expérience est d'évaluer tous les paramètres en jeu dans la formation des aérosols. Ces derniers sont étudiés depuis plusieurs décennies, mais il manquait des données précises sur leurs taux de nucléation, c'est-à-dire les processus par lesquels certaines molécules se combinent en minuscules agrégats. Ce phénomène de nucléation se produit dans l'atmosphère et formerait entre 40 et 70 % des particules qui condensent la vapeur d'eau. Le reste des aérosols provient de la poussière des déserts, de sels marins ou de la suie de combustion.

L'expérience *Cloud* est une enceinte où les chercheurs simulent les conditions atmosphériques : ils contrôlent la pression, la température et les constituants chimiques qui contribuent à former des aérosols. Ils ont ainsi évalué le rôle de la concentration de l'acide sulfurique (H_2SO_4), connu pour servir de précurseur aux aérosols, de l'ammoniac (NH_3) et de la vapeur d'eau. Les processus de nucléation binaire (H_2SO_4-H_2O) et ternaire (par exemple H_2SO_4-NH_3-H_2O) ont pu être observés et mis en équation pour les modéliser. Les chercheurs ont rassemblé les résultats précédents de la collaboration *Cloud* sur ces processus et les ont complétés avec des mesures à plus basse température, jusqu'à 208 kelvins (−65 °C), ce qui correspond à la température de la partie supérieure de la troposphère. À ces processus inorganiques, ils ont ajouté des observations sur des nucléations ternaires organiques qui font intervenir des molécules organiques volatiles telles que l'α-pinène, émis dans l'atmosphère par les arbres.

Avec leur modèle, Eimear Dunne et ses collègues ont ainsi montré que la production d'aérosols de 3 nanomètres, à une altitude inférieure à 15 kilomètres, se répartit entre les différents processus de la façon suivante : 14 % en nucléation binaire, 65 % en nucléation ternaire inorganique et 21 % pour la nucléation ternaire organique. Le modèle global montre un bon accord avec les observations atmosphériques aussi bien à basse altitude qu'à haute altitude.

L'expérience *Cloud* est installée au Cern pour profiter des accélérateurs de particules sur place afin de simuler une source de rayons cosmiques qui bombardent l'atmosphère. En effet, ceux-ci ont un rôle important dans la formation d'aérosols, car ils produisent dans l'atmosphère

des ions qui facilitent la synthèse des aérosols. Cette nouvelle étude estime que 28 % des aérosols sont produits *via* une nucléation induite par un ion. Par ailleurs, dans les régions où le taux de production d'aérosols est faible, les processus avec les ions dominent.

Ces travaux permettent aussi d'éliminer définitivement une hypothèse qui avait été formulée sur le lien entre les rayons cosmiques et le réchauffement climatique. Le flux de rayons cosmiques varie avec l'activité solaire, en particulier avec son cycle de onze ans. Au maximum de son activité, le Soleil émet un vent solaire plus intense, qui réduit le flux des rayons cosmiques arrivant sur l'atmosphère terrestre. Certains chercheurs avaient émis l'hypothèse qu'avec la légère augmentation de l'activité du Soleil ces dernières décennies, la production d'aérosols par les rayons cosmiques aurait diminué, ce qui aurait réduit la couverture nuageuse, donc la réflexion du rayonnement solaire. Cela aurait ainsi contribué au réchauffement du globe. Depuis, des études ont montré qu'il n'y avait pas de corrélation entre les variations du flux cosmique et la couverture nuageuse, ou que ces variations avaient un effet minime.

Les résultats de *Cloud* enfoncent le... clou. Les chercheurs ont calculé, à partir des observations, les taux de production d'aérosols avec des flux de rayons cosmiques correspondant au maximum et au minimum d'activité du Soleil. Ils ont obtenu une variation de l'ordre de 0,1 %. L'effet est donc négligeable, comparé à la production anthropique d'aérosols.

Sean Bailly

J. M. Dunne et al., Science, en ligne le 27 octobre 2016

Virologie

Le virus de l'hépatite C se dévoile enfin

Pendant 27 ans, les biologistes ont étudié le virus de l'hépatite C sans en connaître la structure. Celle-ci apparaît enfin et, avec elle, de nouvelles pistes pour fabriquer un vaccin

L'hépatite C, dont les complications (cirrhose du foie, carcinome hépatocellulaire) causent environ 700 000 décès chaque année selon l'Organisation mondiale de la santé, est la seule maladie virale chronique que l'on sait traiter efficacement : les médicaments disponibles guérissent plus de 90 % des personnes traitées. Pourtant, depuis l'identification du virus responsable de la maladie, il y a 27 ans, par des techniques de biologie moléculaire, personne n'était encore parvenu à décrire sa structure intime. Une équipe tourangelle dirigée par Jean-Christophe Meunier (Inserm U966, faculté de médecine, université François-Rabelais, CHRU de Tours) vient de la révéler en microscopie électronique.

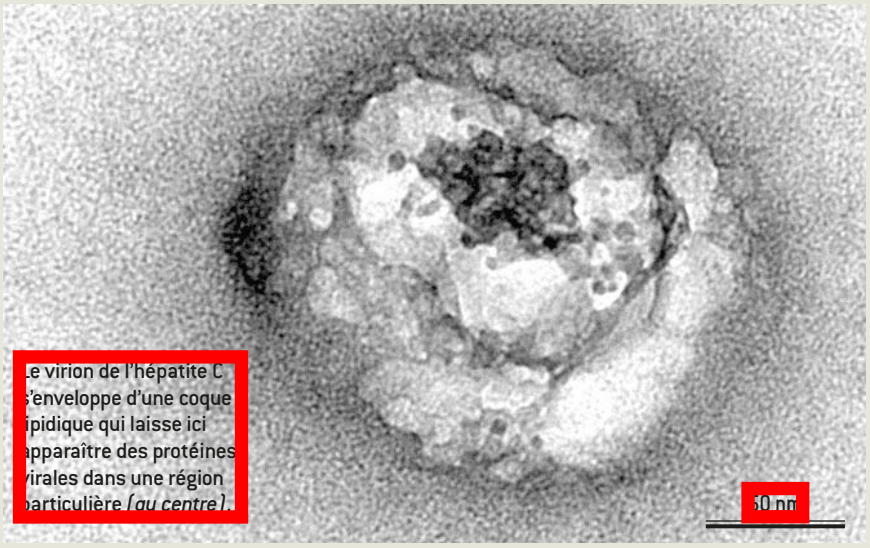
Si les biologistes ont eu tant de mal à observer ce virus, c'est parce que chez les patients infectés, il s'associe avec des composants des lipoprotéines – des particules constituées de lipides et de protéines chargées de convoyer le cholestérol dans le sang – qui leur donnent l'apparence de simples particules lipidiques. Diverses équipes avaient réussi à purifier et observer de telles particules en microscopie électronique, mais les techniques utilisées (centrifugation, modification du virus pour favoriser sa capture à l'aide d'anticorps) n'étaient pas exhaustives : seules certaines catégories de particules étaient sélectionnées, et dans des conditions peu physiologiques.

Jean-Christophe Meunier et ses collègues ont mis au point une technique qui leur permet de capturer des particules virales de toutes catégories, directement dans le sang des patients. Les images ainsi obtenues leur ont permis de mettre en évidence le virus camouflé dans une lipoprotéine *(voir la photo ci-dessous)*.

Le virus est donc bien un cheval de Troie des lipoprotéines, comme le suggéraient les modèles issus des résultats expérimentaux produits ces dernières années. La structure ainsi révélée aidera-t-elle à produire un vaccin contre l'hépatite C, toujours inaccessible ? Peut-être, selon Éric Piver, coauteur des travaux : « Notre approche est fondée sur l'utilisation d'anticorps pour capturer les particules virales. Seules certaines protéines virales semblent être exposées à la surface et donc visibles par le système immunitaire. Cela donne donc des informations sur les structures virales visibles et contre lesquelles notre organisme pourrait réagir. Une approche serait de produire une réponse immunitaire contre les protéines virales exposées à la surface de la particule. »

Marie-Neige Cordonnier

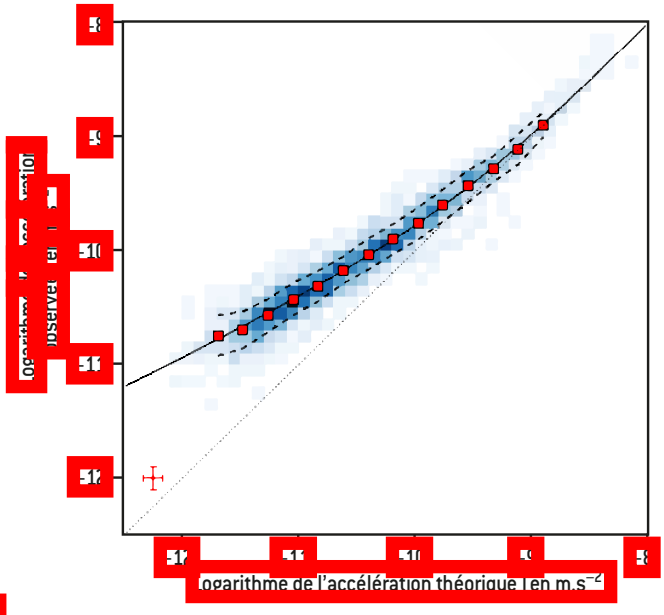
É. Piver et al., Gut, 11 octobre 2016



Le virion de l'hépatite C s'enveloppe d'une coque lipidique qui laisse ici apparaître des protéines virales dans une région particulière *(au centre)*.

Les galaxies spirales défient la matière noire

De récentes observations portant sur des galaxies spirales suggèrent qu'il existe un lien entre la distribution de leur matière ordinaire et celle de leur matière noire. Un résultat embarrassant



En comparant l'accélération mesurée du gaz à celle calculée à partir de la matière visible dans des galaxies spirales *(à gauche)*, les chercheurs ont trouvé une relation simple entre ces deux grandeurs *(à droite)*.

Stacy McGaugh, de l'université Case Western Reserve aux États-Unis, et ses collègues ont-ils trouvé une faille dans l'hypothèse de la matière noire ? Il est trop tôt pour le dire, mais le comportement de la matière noire dans les galaxies spirales serait plus subtil qu'on ne le pensait.

L'hypothèse de la matière noire a été proposée dans les années 1970 pour résoudre le problème du profil des vitesses dans les galaxies spirales : les étoiles en périphérie d'une telle galaxie tournaient trop vite et auraient dû en être expulsées, la force gravitationnelle déterminée à partir de la matière visible des galaxies étant insuffisante pour retenir ces étoiles. On a ainsi supposé que les galaxies sont entourées d'un halo de « matière noire » n'interagissant pas avec la matière visible (ou baryonique) et qui, par sa gravité, empêcherait les galaxies de se disloquer.

Stacy McGaugh et ses collègues ont aussi étudié la dynamique des galaxies spirales. Ils ont établi le profil de vitesse du gaz interstellaire pour 153 galaxies et calculé l'accélération centripète due à la force gravitationnelle exercée par la galaxie. Ils ont aussi recensé la matière baryonique et ont calculé l'accélération centripète correspondante. Cette étude confirme que la matière baryonique, seule, ne suffit pas à expliquer l'accélération centripète observée. L'hypothèse de la matière noire semble confortée.

Les chercheurs ont ensuite montré que, pour toutes les galaxies considérées, il existe une relation simple entre l'accélération centripète observée et celle calculée à partir de la matière baryonique (l'échantillon de galaxies étudiées est très hétérogène, avec des morphologies et des compositions variées). De plus, cette relation reste valable même si la quantité de matière noire requise pour expliquer la dynamique de certaines galaxies est importante. La contribution de la matière noire semble ainsi complètement spécifiée par celle de la matière baryonique. Un résultat contre-intuitif, puisque ces deux types de matière ne sont pas censés interagir, et leurs distributions ne devraient donc pas être corrélées.

Stacy McGaugh et ses collègues proposent trois explications possibles à leur résultat. Selon la première, il pourrait s'agir d'une conséquence de la façon dont les galaxies se forment. Une autre possibilité est que matières noire et baryonique interagissent, comme en font l'hypothèse certains modèles. Enfin, la dernière solution évoquée par Stacy McGaugh et ses collègues suppose que la matière noire n'est pas nécessaire et qu'il faut plutôt invoquer une modification des lois de la gravitation dans un régime où les accélérations sont très faibles, comme c'est le cas dans les marges des galaxies. Cette idée est au cœur de la théorie MOND, proposée en 1983 par Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël.

Cette nouvelle étude ne remet pas nécessairement en cause l'existence de la matière noire, mais elle pose de nouvelles contraintes sur la dynamique des galaxies, qu'un modèle réaliste de matière noire devra expliquer. D'ores et déjà, plusieurs équipes ont simulé la formation de galaxies avec de la matière noire pour retrouver cette relation. Une affaire à suivre...

S. B.

Phys. Rev. Lett., en ligne le 7 nov. 2016

26,8 %

C'est la part supposée de la matière noire dans l'Univers (le reste étant partagé entre l'énergie sombre à 68,3 % et la matière ordinaire à 4,9 %). L'hypothèse de la matière noire explique diverses observations en cosmologie.

Biophysique

Comment les plantes repèrent la verticale

Les plantes sont capables de mesurer leur orientation par rapport à la force de gravité et de pousser vers le haut pour mieux s'exposer à lumière. Mais la perception de la gravité n'est pas encore complètement comprise et deux hypothèses s'affrontent. Bruno Moulia, de l'Inra, et ses collègues ont mis au point une expérience permettant d'écarter l'un des scénarios envisagés.

Les plantes ont des cellules spécialisées qui contiennent des grains d'amidon, les statolithes. En sédimentant dans les cellules, ces grains indiquent le bas. La façon dont les plantes perçoivent la position des statolithes n'est pas encore claire. Selon une hypothèse, les cellules détectent une pression là où les grains d'amidon sédimentent. Une autre idée est que des éléments intracellulaires détectent la position des statolithes.

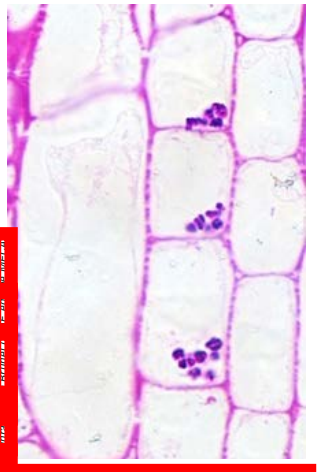
La différence est cruciale. Dans le premier cas, et pas dans le second, le système est incapable de distinguer la gravité d'une autre force, par exemple due au vent qui balaie un champ.

De précédentes expériences avaient exercé l'hypothèse de la pression exercée par les statolithes sur les parois des cellules. Pour s'en assurer, Bruno Moulia et ses collègues ont étudié la croissance de plusieurs centaines de plants de quatre espèces végétales (blé, lentille, tournesol, arabette) dans une centrifugeuse pendant de longues durées pour créer une gravité artificielle. Les chercheurs ont montré que le redressement des plantes est indépendant de l'intensité de cette gravité, ce qui écarte l'hypothèse de la pression. Ainsi, c'est la position des statolithes dans les cellules qui indiquerait la verticale à la plante, et cette donnée ne serait que peu perturbée par des effets fugaces tels que des rafales de vent.

D'après Bruno Moulia et ses collègues, les expériences précédentes avaient mesuré un effet transitoire : le déplacement des statolithes, qui dépend de l'intensité de la gravité, et qui disparaît quand la sédimentation s'achève. Reste maintenant à comprendre comment les plantes enregistrent la position des statolithes dans les cellules.

S. B.

H. Chauvet et al., Scientific reports, vol. 6, 35431, 2016



Certaines cellules végétales, les statocytes, contiennent des grains d'amidon nommés statolithes *(en violet foncé)*, qui indiquent à la plante la direction verticale.

En Méditerranée à +3 °C

L'accord de la COP21 à Paris, en 2015, a fixé comme objectif de limiter la hausse de la température moyenne globale à 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Mais pour certaines régions, cet objectif correspond à une hausse plus importante : on prévoit environ 3 °C pour le bassin méditerranéen. Joël Guiot et Wolfgang Cramer, de l'université Aix-Marseille, ont étudié l'impact de ce réchauffement sur les écosystèmes terrestres de cette région. Ils ont étudié les écosystèmes passés à partir des registres de pollen sur tout l'Holocène (ces 10 000 dernières années) et ont simulé leur évolution d'ici à la fin du siècle. Ils montrent ainsi que les écosystèmes méditerranéens ont connu pendant l'Holocène des périodes de sécheresse, mais sans hausses significatives des températures. Alors qu'un réchauffement global de 2 °C et plus conduira à d'importantes transformations, sans équivalent à l'Holocène, telles que la désertification de régions du sud de l'Europe et du nord de l'Afrique.

Botanique

Lumière sur la reproduction de la truffe noire

On connaît mal le cycle de reproduction de la truffe noire du Périgord (*Tuber melanosporum*), le « diamant noir de la cuisine française ». Ce qui explique en partie pourquoi on ne sait pas cultiver ce précieux champignon. Une étude publiée par des chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle, du CNRS et de l'université de Montpellier apporte cependant de nouvelles informations.

Elisa Taschen et ses collègues les ont obtenues à partir d'analyses génétiques réalisées sur 950 échantillons de truffe récoltés en Languedoc-Roussillon, dans des sites naturels ou dans des plantations d'arbres préalablement « ensemencés » avec le champignon (le mycélium, ou réseau de filaments qui le constitue vit en association avec les racines de certains arbres).

Qu'a-t-on appris ? Rappelons d'abord que la « truffe » elle-même est en quelque sorte le fruit du champignon. Or les chercheurs ont établi que cet organe est le résultat d'une fécondation entre deux individus très différents.

L'un a un mycélium étendu, persistant et associé aux racines des arbres voisins. Il est qualifié de « maternel » parce que c'est lui qui nourrit la truffe – la chair nourrissière et protectrice de celle-ci est constituée de tissus « maternels », tandis que les spores contenues dans cette chair, issues d'une fécondation, portent un mélange de gènes des deux parents.

Quant à l'individu « paternel », il est plus mystérieux, mais selon l'étude d'Elisa Taschen et ses collègues, il est moins étendu, ne vit le plus souvent qu'une année et n'est pas associé aux racines d'arbres. Il fournit seulement ses gènes à la truffe. Ce serait un individu qui ne survit que pour féconder un individu mieux installé.

Maurice Mashaal

E. Taschen et al., Molecular Ecology, en ligne le 18 octobre 2016

Le « fruit » du champignon *Tuber melanosporum* est issu d'une fécondation entre deux individus de types différents, l'un dit maternel et l'autre dit paternel, qui ne fournit que ses gènes.

Actualités

Dix fois plus de galaxies !

Dans les années 1990, les images du télescope spatial *Hubble* avaient permis d'estimer que l'Univers visible contenait près de 100 milliards de galaxies. Une équipe menée par Christopher Conselice, de l'université de Nottingham, au Royaume-Uni, a réévalué ce chiffre en compilant de nouvelles données. Il y en aurait au moins dix fois plus. Ce sont surtout les galaxies petites et peu lumineuses de l'Univers jeune, donc lointain, qui n'avaient pas été prises en compte.

Records d'éclairs

Depuis la fin des années 1990, époque à laquelle des réseaux de détection à haute précision de radiofréquences émises par les éclairs ont commencé à être installés, la plus grande distance horizontale parcourue par un éclair enregistré est de 321 kilomètres. Il s'agit d'un éclair survenu le 20 juin 2007 dans l'Oklahoma, aux États-Unis. Quant à l'éclair le plus long, détecté le 30 août 2012 dans le sud de la France, il a duré 7,74 secondes. C'est ce qu'a conclu un comité d'experts mandaté par l'Organisation mondiale de météorologie.

Dix mois sans atterrir

Les martinets noirs *(Apus apus)* volent longtemps sans se poser. On le savait, mais Anders Hedenström, de l'université de Lund en Suède, et ses collègues l'ont prouvé et mesuré. En équipant des individus avec des capteurs, les chercheurs ont montré que, dans les dix mois de l'année où ils ne sont pas occupés à se reproduire, les oiseaux restent en vol pendant plus de 99 % du temps. Certains individus ne se sont même jamais posés durant cette période. Reste à comprendre quelles adaptations physiologiques rendent possible cette prouesse exceptionnelle.

Evolution

Comment des lézards sont devenus serpents

Il y a environ 100 millions d'années, certains lézards se sont allongés et ont perdu leurs pattes, devenant des serpents. Des modifications morphologiques aussi importantes sont souvent liées à l'altération de l'expression de certains gènes et aux mécanismes de régulation de ceux-ci. Dans le cas des serpents, le processus restait à déterminer. Axel Visel, du laboratoire américain Lawrence Berkeley, et ses collègues se sont intéressés au gène *Sonic hedgehog* qui participe à la croissance des membres et à un régulateur de ce gène, ZRS.

Sonic hedgehog et ZRS sont présents chez de nombreux vertébrés, et une mutation de ZRS conduit souvent à des malformations des membres. Axel Visel et ses collègues ont utilisé CRISPR, une méthode d'édition du génome très précise, pour étudier ZRS chez différentes espèces. Ils ont par exemple, remplacé chez des souris la chaîne d'ADN correspondant au régulateur par celle de l'homme ou du poisson. Les souris développaient alors des pattes normales. Mais quand on remplaçait la séquence de nucléotides par celles des serpents, les membres étaient tronqués. En comparant les génomes des serpents et des autres vertébrés, les chercheurs ont mis en évidence une délétion de 17 paires de nucléotides chez les premiers. L'histoire de la perte des pattes des serpents est probablement complexe, mais la perte de fonction de ZRS a certainement joué un rôle.

S. B.

E. Z. Kvon et al., Cell, vol. 167, pp. 633-642, 2016

Insolite

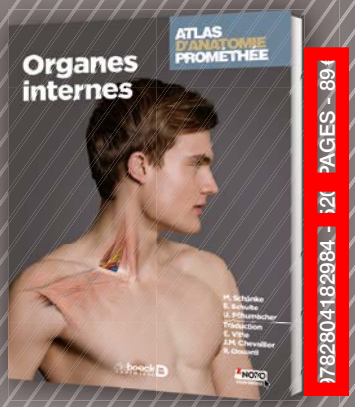
Les chaussures romaines de Vindolanda

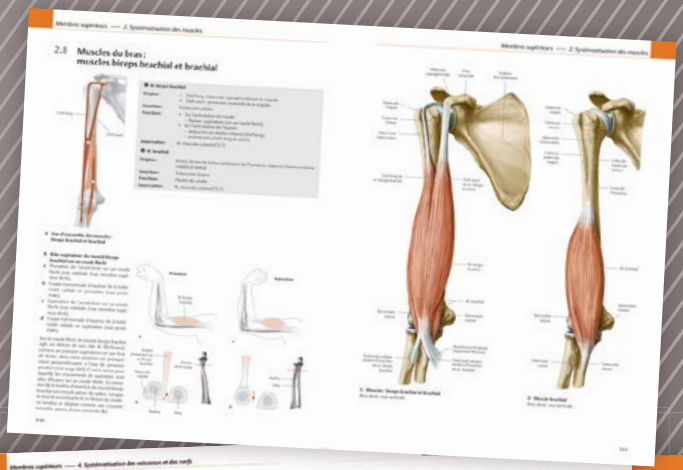
En 212, les soldats romains de Vindolanda, sur le mur d'Hadrien dans le nord de l'Angleterre, fuient et abandonnent leur fort. Ils jettent alors tout ce qu'ils ne peuvent emporter. Dans le lot, les archéologues ont trouvé, bien conservées, 421 chaussures de bébés, enfants, adolescents, femmes et hommes, pour la maison ou l'extérieur. Une trouvaille qui montre que chaque habitant du fort faisait usage de plus d'une paire de chaussures.

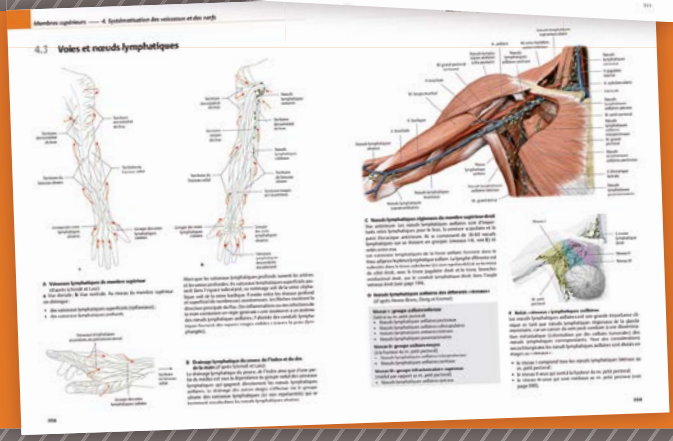
Tout le corps humain en 3 volumes

ATLAS D'ANATOMIE PROMÉTHÉE

DÉCOUVREZ également :







- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**, pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle, hyperréalistes

Actualités

L'antiproton repesé

En principe, les antiparticules ont la même masse que leurs homologues. Pour s'en assurer, les physiciens de l'expérience *Asacusa* au Cern ont amélioré le dispositif qui détermine la masse de l'antiproton. Des antiprotons sont injectés dans un gaz d'hélium. Ces antiparticules (de charge électrique négative) se substituent à l'un des deux électrons des atomes d'hélium. Le système étant refroidi à 1,5 kelvin, ces atomes hybrides vivent assez longtemps pour être excités avec un laser. L'émission lumineuse résultante permet d'estimer la masse de l'antiproton avec une précision record... et sans écart décelable avec la masse du proton.

Biodiversité française

Le Muséum national d'histoire naturelle a recensé 182 498 espèces de faune et de flore, terrestres et marines, en France pour 2016. Cela représente près de 10 % de la biodiversité mondiale connue. Cette liste est complétée d'année en année. Le Service du patrimoine naturel du Muséum estime que 80 % à 90 % de la biodiversité de la métropole a été recensée. Et l'Outre-mer ? Après la Guyane en 2015, une expédition prospecte en Nouvelle-Calédonie pour compléter l'inventaire.

Chimie

Le parfum de l'encens enfin expliqué

L'encens, obtenu à partir de la résine de certains arbres, est l'un des plus anciens parfums utilisés par l'homme. Les premières traces de son usage remontent au quatrième millénaire avant notre ère. Cependant, les composés qui contribuent à la note de fond de ce parfum de « vieilles églises » restaient à identifier. L'équipe de Nicolas Baldovini, de l'institut de chimie de Nice, en partenariat avec la société Albert Vieille, a résolu le mystère.

Lors de précédentes études, certaines molécules avaient déjà été isolées dans des huiles essentielles de résine d'encens. Elles contribuent au parfum, mais ne portaient pas exactement l'odeur caractéristique des églises. Pour trouver les molécules odorantes élusives, Nicolas Baldovini et ses collègues ont utilisé trois kilogrammes d'huile essentielle extraite de résine de bonne qualité. Ils ont progressivement isolé les molécules puis, avec un système de chromatographie-olfactométrie, des personnes ont utilisé leur nez pour identifier quel élément portait l'odeur caractéristique. En effet, les molécules odorantes sont souvent présentes dans des concentrations si infimes qu'elles sont difficiles à déceler par des instruments de mesure. Dans ce domaine, le nez est d'une efficacité incomparable.

L'encens, brûlé au cours de certains offices religieux, a un parfum caractéristique. Deux molécules clés ont été identifiées.

Les chercheurs ont ainsi détecté deux molécules inconnues donnant la note de fond de l'encens. Leur structure moléculaire a été déterminée par résonance magnétique nucléaire. Il s'agit de deux acides, isomères l'un de l'autre, c'est-à-dire ayant la même structure moléculaire, mais une configuration spatiale différente : les acides (+)-trans-2-octylcyclopropane-1-carboxylique et (+)-cis-2-octylcyclopropane-1-carboxylique. Les chercheurs les ont nommés acides olibaniques, de l'oliban, un autre nom donné à l'encens.

Pour s'assurer qu'elle avait bien identifié les bonnes molécules, l'équipe de Nicolas Baldovini a synthétisé les deux isomères et confirmé leur pouvoir odorant. Un résultat qui intéressera sûrement les parfumeurs.

S. B.

Angewandte Chemie Int. Ed., en ligne le 4 octobre 2016

Biologie animale

Ces araignées qui entendent avec leurs pattes

Le monde sensoriel des araignées sauteuses (*Salticidae*) ne serait pas limité à une vision efficace et à la capacité de percevoir des vibrations proches. Paul Shamble, à l'université Cornell, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert que ces espèces d'araignées ont aussi une bonne ouïe.

Cette découverte a été réalisée par hasard. Paul Shamble et ses collègues cherchaient à étudier la réponse neuronale à des stimuli visuels quand ils ont découvert que le cerveau de ces araignées réagissait à des sons que les chercheurs faisaient jusqu'à près de 3 mètres de distance. Ce résultat est surprenant, car les animaux capables d'entendre loin sont, en général, pourvus de tympans, organes absents chez ces araignées.

Les chercheurs ont déterminé que l'araignée sauteuse entend les sons d'au moins 65 décibels et correspondant à des basses fréquences, entre 80 et 380 hertz. La détection d'un son s'accompagne d'une réaction spécifique : l'animal s'immobilise en moins de 0,1 seconde. D'après ces caractéristiques, les chercheurs pensent que l'arthropode serait capable de percevoir une menace volante telle que des guêpes prédatrices, dont les battements d'ailes émettent des sons de 100 hertz et plus.

Comment ces petits arachnides entendent-ils ? Les chercheurs ont étudié de près les poils de leurs pattes, déjà connus pour percevoir avec une grande sensibilité les vibrations à courte distance. Paul Shamble et ses collègues ont stimulé mécaniquement des poils individuels et ont enregistré dans le cerveau de l'araignée une activité dont les signaux sont équivalents à ceux obtenus par des sons émis à plusieurs mètres de distance. Autrement dit, l'araignée entend avec ses pattes poilues !

S. B.

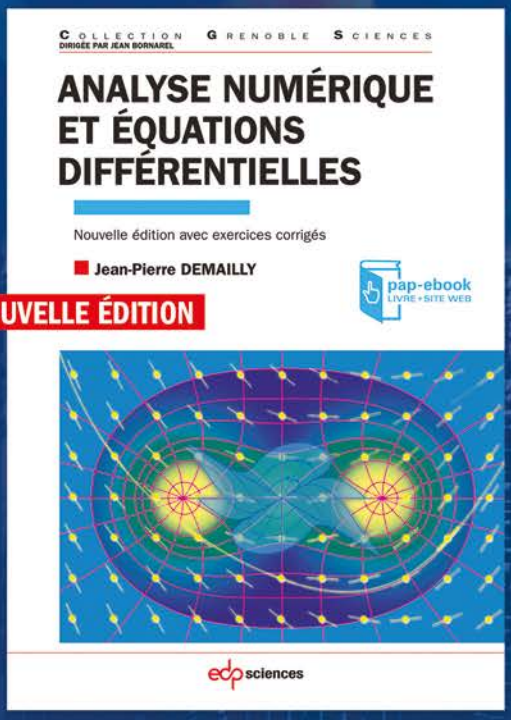
P.S. Shamble et al., Current Biology, vol. 26, pp. 1-8, 2016

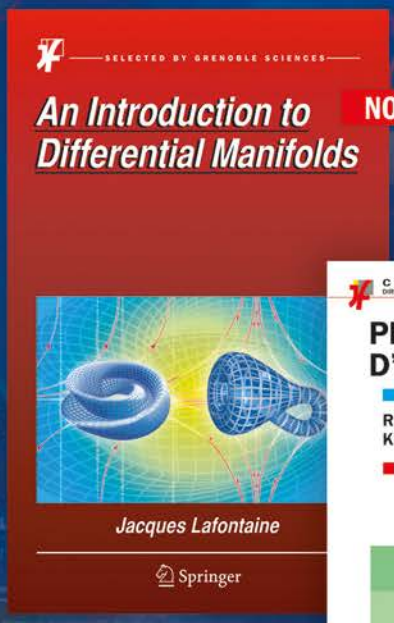
Les araignées sauteuses sont connues pour avoir une excellente vue qu'elles utilisent pour chasser et pour se repérer dans leur environnement. Mais elles auraient aussi l'ouïe fine !

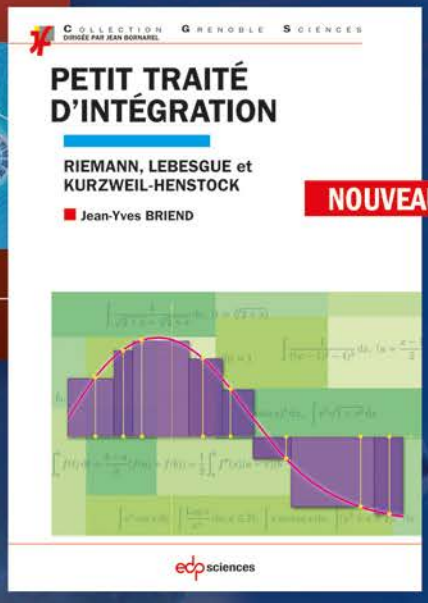
GRENOBLE SCIENCES

CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

La nouvelle édition enfin en librairie







Découvrez nos autres titres labellisés ...

www.grenoble-sciences.fr

GRENOBLE SCIENCES

UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet : *laboutique.edpsciences.fr*

Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

AUVERGNE – RhôneAlpes

Actualités

Biomédecine

Du microbiote intestinal aux maladies neurodégénératives

Maladies de Parkinson et d'Alzheimer, dégénérescence frontotemporale, sclérose latérale amyotrophique : quel est le point commun de ces pathologies cérébrales ? La mort de neurones dans différentes régions cérébrales, à cause, entre autres, de l'accumulation de protéines « agrégées » dites amyloïdes. Ces anomalies protéiques, sortes de pelotes qui s'agrègent dans le cerveau, se propagent de neurone en neurone, entre les différentes régions cérébrales et même entre diverses parties du corps, provoquant probablement une inflammation et la mort des cellules. D'où proviennent-elles ? Shu Chen, de l'université Case Western Reserve, à Cleveland, et ses collègues montrent qu'elles seraient issues de nos intestins, précisément des bactéries formant le microbiote intestinal.

Nos intestins renferment plus de 1,5 kilogramme de bactéries aux rôles variés (digestifs, anti-inflammatoires…), pour la plupart inoffensives. Mais depuis 2002, on sait que certaines produisent des protéines amyloïdes, qui favorisent leur prolifération, leur adhérence et leur résistance. Les plus étudiées sont les « curli » des bactéries *Escherichia coli*. Les chercheurs ont supposé que ces protéines amyloïdes de la flore intestinale provoquaient l'apparition des protéines amyloïdes dans les neurones du cerveau. Ils ont donc choisi d'étudier l'agrégation de l'une de ces protéines, l'alpha-synucléine, qui s'accumule chez les patients atteints de la maladie de Parkinson. Pour ce faire, ils ont nourri pendant deux ou trois mois 344 rats âgés avec des bactéries *E. coli* produisant des curli, tandis que d'autres animaux recevaient des bactéries modifiées n'en produisant pas.

Les rats du premier groupe ont présenté des protéines alpha-synucléines agrégées dans leurs intestins et dans leurs neurones, alors que ceux du second groupe en ont développé très peu. En outre, l'apparition des protéines amyloïdes provoquait une réaction inflammatoire locale intense dans le cerveau des rats, comparable à celle observée dans le cerveau des malades humains.

Cette étude est l'une des premières à démontrer que le microbiote est capable de provoquer l'agrégation de protéines dans les neurones. Bien que le mécanisme de propagation des « pelotes » reste inconnu, on a là une nouvelle piste de recherche pour mieux comprendre les maladies neurodégénératives.

Bénédicte Salthun-Lassalle

S. Chen et al., Nature, en ligne le 6 octobre 201

Paléontologie

Du mimétisme très ancien

Un fossile d'aile de sauterelle du Permien, nommée *Permotettigonia*, a été retrouvé dans les roches rouges du dôme de Barrot dans les Alpes-Maritimes. Or André Nel, du Muséum national d'histoire naturelle, l'a étudié avec des collègues et a constaté que cette aile antérieure datant de quelque 265 millions d'années est très similaire aux ailes des sauterelles-feuilles d'aujourd'hui, qui ressemblent à s'y méprendre à une feuille.

Pour s'en persuader, les chercheurs ont cartographié précisément les nervures des ailes antérieures de toute une série de sauterelles actuelles faisant partie de la famille des Tettigoniidés comme *Permotettigonia*. Leur comparaison a conduit à les classer par similarité en deux groupes, dont l'un correspond à celui des sauterelles imitant les feuilles. L'aile de *Permotettigonia* en fait partie, ce qui suggère que cet insecte imitait aussi les feuilles.

Lesquelles ? Pour nous, une « feuille » est avant tout un organe photosynthétique de plantes à fleurs, qui n'existaient pas au Permien. Les chercheurs se sont donc demandé quelles feuilles les ailes de *Permotettigonia* imitaient. Malheureusement, dans la formation du dôme de Barrot, aucune plante n'est connue. Parmi celles des autres formations permiennes de France (Var, Hérault), toutes produites par des milieux lacustres ou fluviatiles, ils ont noté la présence de *Taeniopteris*, un genre de fougère dont les feuilles présentent une veine centrale et des veinules, tout comme l'aile de *Permotettigonia*.

Ainsi, cette espèce aurait acquis des ailes qui la camouflent de ses prédateurs, sans doute d'autres insectes volants. L'aile de cette sauterelle représente en tout cas le plus ancien cas de mimétisme connu à ce jour.

François Savatie

A. Nel et al., Nature, à paraître

L'aile de la sauterelle *Permotettigonia* ressemble à une feuille nervurée, avec sa grande veine centrale (nervure principale) et ses ramifications. La feuille imitée ne pouvait être celle d'une plante à fleurs.

e plus fort et le plus lointain flash gamma

Jamais le flash gamma d'une source aussi lointaine et d'aussi haute énergie n'avait été détecté. Mesuré par l'observatoire MAGIC, aux îles Canaries, et par d'autres télescopes, ce signal a été émis, selon les chercheurs, lors d'une explosion gigantesque près du trou noir central de la galaxie QSO B0218+357. Il a été reçu directement, puis à nouveau au bout de onze jours, parce qu'il a été dévié par une lentille gravitationnelle due à la galaxie B0218+357G, située à un milliard d'années-lumière de QSO B0218+357.

Une MST issue de Néandertal ?

Des chercheurs du CNRS et de l'Institut catalan d'oncologie ont reconstruit l'histoire évolutive de la diversification du papillomavirus humain après en avoir séquencé 118 sous-types. Ils concluent que ce virus infectait déjà l'ancêtre d'*Homo neanderthalensis* et *H. sapiens*, il y a 500 000 ans, qu'il a ensuite divergé en deux souches, en même temps que ces deux espèces humaines. Toutefois, la souche PVH 16, qui provoque des cancers du col de l'utérus, n'est apparue chez les hommes modernes qu'après leur sortie d'Afrique, il y a 100 000 à 60 000 ans, de sorte qu'elle résulterait de leur métissage avec les Néandertaliens.

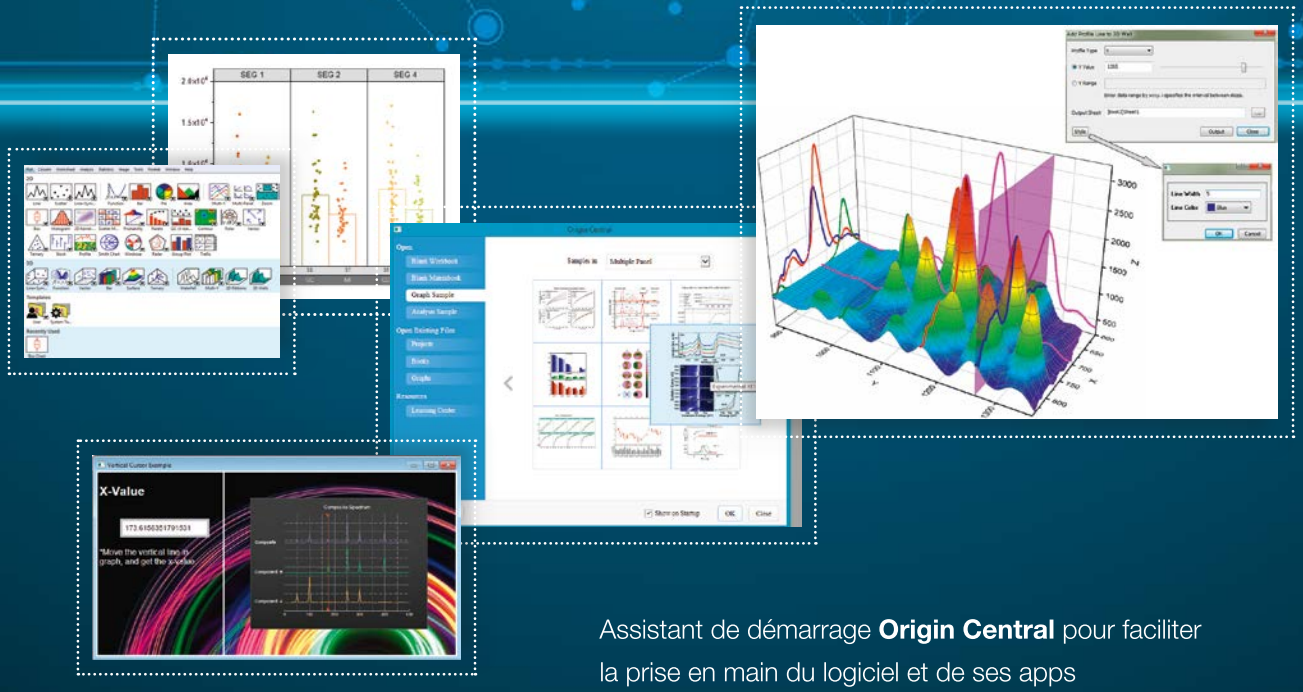
Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

UNE INTERFACE REPENSÉE ET DES POSSIBILITÉS DÉMULTIPLIÉES

ORIGIN® 2017

Graphing & Analysis



Assistant de démarrage **Origin Central** pour faciliter la prise en main du logiciel et de ses apps

Nouvelles **applications** dans le User File Exchange

Classeurs ou books plus intuitifs et proches de **Microsoft Excel®**

Customisation possible en **HTML / CSS** pour produire des rapports de qualité

Encore plus de personnalisation des **graphes**

Windows 10 Compatible

NOUVELLE VERSION ORIGIN 2017

ritme.com/origin

Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42

Distributeur officiel en France

RITME

ORIGIN est une marque déposée de OriginLab. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives. © 2016 RITME

ENTRETIEN

Enseignement : « Il faut donner du sens aux nombres dès la maternelle »

Au sortir du collège, en France, de plus en plus d'élèves ne maîtrisent pas les calculs sur des nombres entiers. Pourtant, en donnant du sens aux nombres, on permet à des élèves de CE1 de résoudre des problèmes de niveau collège.

Stella BARUK est professeure de mathématiques et chercheuse en pédagogie.

À la fin de l'école primaire, environ 30 % des enfants n'ont pas les bases suffisantes en mathématiques et en sciences. Et ces résultats sont directement liés à l'origine sociale : alors que dans les milieux les plus favorisés, seuls 10 % des élèves sont concernés, dans les familles les plus modestes, ils sont 45 %, soit près d'un enfant sur deux. Tel est l'un des constats de la dernière étude du ministère de l'Éducation nationale, réalisée en novembre 2015 sur 160 000 élèves de 6e dans plus de 4 000 collèges et publiée en juin 2016. Ces résultats confirment ceux de l'enquête PISA 2012 (le programme international de l'OCDE pour le suivi des acquis des élèves), qui estime que près de un quart des élèves de 15 ans en France ont un niveau très bas en mathématiques – une proportion en augmentation depuis 2003 – et qui place la France en tête du déterminisme social parmi les pays de l'OCDE. Dans son livre *Les Chiffres ? Même pas peur !* (PUF, 2016), Stella Baruk, chercheuse en pédagogie des mathématiques, invoque comme principale cause des difficultés en mathématiques l'inchiffrisme précoce – le déficit dans l'accès aux chiffres. Voici son éclairage, fondé sur plus de quarante ans de réflexions et d'actions dans les écoles.

POUR LA SCIENCE

Quelles bases attend-on en mathématiques à la fin de l'école primaire ?

STELLA BARUK : Il s'agit des compétences du socle commun en vigueur au moment de l'étude. En l'occurrence, en mathématiques, un enfant en fin de primaire doit connaître et savoir utiliser les nombres décimaux et les fractions, maîtriser les quatre opérations, savoir résoudre des problèmes ayant trait à la proportionnalité, convertir des grandeurs et construire différents éléments géométriques (hauteur d'un triangle, symétrique d'une figure par rapport à un axe quelconque…). Il doit aussi pouvoir utiliser toutes ces notions pour produire de façon autonome des réponses argumentées lors de la résolution de problèmes.

PLS

Quelles sont les lacunes des élèves ?

S. B. : En France, en 2014, 16 % des élèves ne maîtrisaient pas le système de numération des nombres entiers et la soustraction avec retenue, selon l'enquête nationale Cedre 2014, réalisée sur un échantillon d'environ 8 000 élèves de CM2, soit environ autant qu'en 2008. Et les choses ne s'améliorent pas ensuite. En 2014, 19 % des élèves de 3e avaient encore des difficultés à réaliser des calculs sur les nombres entiers et décimaux relatifs, contre 15 % en 2008, selon l'autre volet de la même étude, réalisé sur un échantillon similaire de jeunes en fin de collège.

PLS

En 2011 déjà, le ministère de l'Éducation nationale a lancé un plan « sciences et technologies à l'École » visant à prévenir l'innumérisme, qu'il définit comme étant « à la maîtrise des nombres, du raisonnement et du calcul ce qu'est l'illettrisme à la maîtrise de la langue ». Pourquoi préférez-vous parler d'inchiffrisme ?

S. B. : La comparaison de l'innumérisme à l'illettrisme donne l'illusion d'une symétrie qui n'existe pas. Ce n'est pas parce que vous ne pouvez pas lire un mot que celui-ci n'a pas de sens. Même si l'illettrisme est un lourd handicap social, les personnes concernées disposent toujours d'une langue orale pour parler, réfléchir, communiquer, raisonner. Au point que sur les 2,5 millions d'illettrés recensés en France en 2011, plus de la moitié ont un emploi. En revanche, l'incapacité de lire l'écriture chiffrée empêche tout accès à des énoncés où elle intervient, et donc aux opérations et à leur sens, de même qu'à tout algorithme de calcul.

En d'autres termes, un élève qui n'a pas accès aux chiffres a rapidement de grandes chances de renoncer au sens en mathématiques, pour ne plus appliquer que des techniques et des règles apprises, sans savoir pourquoi il les applique. C'est ainsi que l'on obtient des adolescents puis des adultes imperméables à toute démarche mettant en jeu des données chiffrées ; on les dira alors en situation d'innumérisme.

La première rupture apparaît souvent avec l'introduction du zéro en maternelle

Pour le ministère de l'Education nationale, l'innumérisme est l'incapacité de mobiliser les notions élémentaires de mathématiques, du calcul et des modes de raisonnement associés. Mais cette incapacité n'est pas un état : elle est le résultat d'un processus qu'il s'agit de prévenir en agissant à la source – en luttant contre l'inchiffrisme.

PLS

Comment se manifeste l'inchiffrisme ?

S. B. : De plusieurs façons qui ont toutes la même origine. D'abord par l'incompréhension du rôle des chiffres dans l'écriture des nombres, par exemple quand un enfant écrit 30047 pour « trois cent quarante-sept ». Ensuite par la difficulté d'attribuer aux chiffres une signification autre que celle, primordiale, des 1, 2, 3, 4, ..., 9 originels. C'est-à-dire d'accepter que « 3 » puisse *signifier* le nombre « trois », mais aussi le nombre « trente » dans 37, ou le nombre « un tiers » dans 2/3, ou une « puissance trois », dans 2^3.

Toutes choses qui ont pour effet de compromettre le rôle des chiffres dans l'expression des quantités quelles qu'elles soient, matérielles ou numériques.

Aussi curieux que cela puisse paraître, l'enfant qui répond 6 quand on lui demande combien de gâteaux il y a dans 4 *paquets* de 2 *gâteaux* est dans le même brouillard numérique que l'élève qui, en 4e, trouve 6 *huitièmes* en additionnant 4 *cinquièmes* et 2 *tiers* (*voir la photo page 18*). Seul compte le 4 + 2 = 6 de l'enfance. C'est cela, l'inchiffrisme : des chiffres et des signes (le signe + en particulier) figés dans une fonction de comptage, vidés très tôt de leur sens. D'où l'innumérisme.

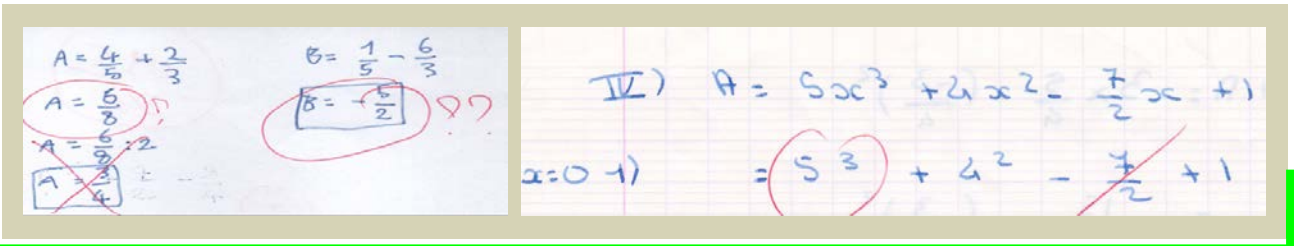
Résultat, à la fin de l'école primaire, un élève sur quatre ne sait pas écrire un grand nombre entier (supérieur à 10 000) en chiffres (par opposition à l'écriture en mots), rapportaient le Conseil national d'évaluation du système scolaire et l'Institut français de l'éducation, dans le cadre de la Conférence de consensus sur la numération qu'ils ont organisée en novembre 2015.

PLS

À quel moment perd-on les enfants et pourquoi ?

S. B. : La première rupture apparaît souvent avec l'introduction du 0. Ce qui est attendu des enfants en fin de maternelle, c'est de savoir « lire les nombres écrits en chiffres jusqu'à dix ». Mais les enfants voient le 0 apposé au 1 pour former 10 comme s'il s'agissait d'associer deux lettres *b* et *a* pour constituer la syllabe *ba*. Si ce côte à côte n'a aucune raison d'être, aucune justification, c'est une blessure intellectuelle. Or avec une matière aussi limitée, l'explication, qui est fondatrice du système décimal, n'est pas facile à donner. Il faut donc différer l'écriture chiffrée du dix. C'est d'abord un *mot* qui a du sens et qui, pour être chiffré, attendra d'entrer en numération.

Par ailleurs, les enseignants tiennent absolument à traiter 0 comme un nombre – ce qui est vrai mais arrive trop tôt. Car en numération, 0 a d'abord un statut de chiffre. Le mélange de ces deux états peut avoir des effets redoutables. Les



DEUX ERREURS DE COLLEGIENS « EN SITUATION D'INNUMERISME ». Le premier, en 4e, devait additionner des fractions. Il a « compté ensemble » les numérateurs et les dénominateurs. Le second, en 3e, devait remplacer *x* par 0 dans l'expression A. Il a remplacé *x* par... rien.

enfants confondent nombre et chiffre, et 0 se met à n'avoir plus aucun sens pour eux. Pourquoi leur faire « décomposer » 4 en « 4 + 0 » ? Pourquoi leur faire additionner 0 sans utilité, ce qui les amènera à écrire 6 + 0 = 60 ? Pourquoi ajoute-t-on un 0 ? De quel 0 s'agit-il ? Parmi les innombrables erreurs, plus ou moins pittoresques, engendrées par ces confusions qui pénalisent les enfants et trop souvent perdurent au collège, il y a celle ci-dessus à droite, rencontrée en classe de 3e : il s'agit de remplacer *x* par zéro dans l'expression A. Voyez ce que cela donne ! Les exposants de x^3 et x^2 se retrouvent en lévitation, et « 7/2 fois *x* » devient 7/2. Nous voici en plein innumérisme.

PLS

Comment éviter l'inchiffrisme ?

S. B. : Ce qui pénalise lourdement l'enseignement de la numération, c'est le recours constant au comptage, l'obligation de la manipulation, l'illusion du concret. Or il s'agit avant tout d'apprendre à lire/écrire/parler un nombre, à connaître le sens de chacun de ses chiffres, à maîtriser la décimalité de son écriture. Il faut donc savoir aller lentement en fin de grande section et au début du CP pour un travail en profondeur sur les briques élémentaires – les nombres à un seul chiffre –, qui doivent être maîtrisés dans leurs écritures, leurs représentations, leurs organisations, leur énonciation.

Les nombres à deux chiffres sont les plus difficiles à aborder. Certes, ils sont aisément représentables et montrables parce que nous avons dix doigts. Mais c'est là que les disparités sont les plus nombreuses entre énonciation et écriture chiffrée. Ensuite, pourvu que l'on abandonne l'illusion de faire du concret en représentant les centaines avec des plaques carrées, l'apprentissage des nombres à trois chiffres est beaucoup plus facile et peut aller très vite.

Et il n'y a aucune raison de s'arrêter là. Pourquoi distille-t-on les mille, puis les dix mille, pour s'y arrêter arbitrairement en CE2 ? Comme les nôtres, les oreilles des enfants baignent dans les milliards et les millions : ces nombres sont partout, dans la langue ou sous forme d'écriture chiffrée. Les écrire n'est rien d'autre qu'organiser les chiffres trois par trois. Les enfants savent lire le mot « liberté » avant d'avoir une idée un peu consistante de ce qu'il représente. Pourquoi n'en serait-il pas de même pour le nombre 637 ? Et pour 23 456 ? Il faudrait attendre qu'ils aient une idée de ce que cela représente en éléphants, en fourmis ?

La volonté de faire du concret et de l'utile, l'accent mis sur le calcul avec les premiers nombres, font oublier qu'il s'agit avant tout d'apprendre à lire et à écrire des entités qui ont du sens « en langue » et s'empliront de sens concret avec le temps. Les mesures et le système métrique arrivent trop tôt, par exemple. En attendant, il est essentiel de donner aux enfants les moyens d'éprouver, avec les grands nombres, la notion de système de numération en n'étouffant pas leur imagination.

PLS

Avez-vous pu mettre vos idées en pratique ?

S. B. : Oui. Mon postulat – qui n'a rien de surprenant – est que si dès le CP, on fait des mathématiques qui ont du sens, la fameuse cassure entre la fin de l'école primaire et l'entrée au collège n'aura pas lieu. J'ai donc trois fois proposé à l'Éducation nationale un projet qui a donné lieu à trois expérimentations, dans des écoles du XIe, puis du XIVe arrondissements, à Paris. Chaque fois, j'intervenais au cours de deux années consécutives, dans les classes de CP puis de CE1 – une fois jusqu'en CE2 – et auprès de leurs enseignants. Et chaque fois, cela a été une expérience formidable.

PLS

Quels résultats avez-vous obtenus ?

S. B. : Lors de la première de ces expérimentations, j'étais libre de répartir le programme dans le cycle CP-CE1. Dès la fin du CP, les enfants savaient lire et écrire n'importe quel nombre, en chiffres, en mots. Sachant qu'avec l'addition et la multiplication d'entiers naturels, il est possible de décrire n'importe quelle quantité effective, discrète et homogène, ces opérations ont été introduites presque ensemble. Et, du même coup, la notion – primordiale – d'une quantité ou d'un nombre organisé (en somme, en produit ou en une écriture mixte). Par exemple, on demandait aux enfants de dire combien de places compte un restaurant comportant une table de six et quatre tables de cinq. Ils écrivaient alors très simplement « 6 + 4 × 5 », puis le calculaient correctement, obtenant 26. Or au collège, l'erreur classique consiste à d'abord effectuer 6 + 4, puis à multiplier le résultat par 5, pour ne pas avoir reconnu la *forme* de l'expression et l'organisation à laquelle elle renvoie. En fin de CE1, avec une langue numérique transparente rendant les calculs faciles (tables d'addition et de multiplication comprises), les enfants étaient prêts pour bien des exercices de collège ! Sans aucune peur des chiffres...

PLS

Voit-on une différence dans la façon dont les enfants abordent et comprennent les mathématiques par la suite ?

S. B. : Je n'ai malheureusement pas eu la possibilité de suivre des enfants sur le long terme, mais dans certaines écoles, j'ai eu des retours d'enseignants sur les élèves que j'avais accompagnés en CP/CE1 et qui arrivaient en fin d'école primaire. Ils étaient entraînés à poser des questions, à répondre à celles qu'on leur posait. Bref, ils étaient dans une exigence

de sens que des parents ont aussi notée, et ce, quel que soit le milieu social, comme si cette exigence s'étendait au monde qui les entoure. C'est un bel aspect des mathématiques, qui semble convenir tant aux enfants « normaux » qu'à ceux que l'on dit en difficulté. On suspecte souvent les actions éducatives visant à réduire les inégalités de niveler par le bas. Ce que je propose me paraît procéder du contraire. L'expérience montre que chaque élève y trouve son compte. L'imagination est là, en chacun d'eux, et c'est elle qui s'épanouit au ruthme de chacun.

PLS
Comment les enseignants accueillent-ils vos idées ?

S. B. : Les deux volumes de *Comptes pour petits et grands* (Magnard, 1997 et 2003), fruits des deux premières expérimentations, ont eu un effet de bouteille à la mer incroyable. De nombreux enseignants insatisfaits de ce qu'ils faisaient ont suivi mon approche et se sont fabriqué leur propre matériel pédagogique, avec des résultats formidables.

Dans les années 2000, notamment, j'ai formé des enseignants de Nouvelle-Calédonie dans le cadre du transfert de compétences qui avait été prévu par l'accord de Nouméa de 1998. Pendant quatre ans, j'ai vu ces enseignants devenir eux-mêmes chercheurs. Ils étaient dans une sorte d'excitation intellectuelle qui a produit de beaux résultats dans les classes, en brousse comme dans les quartiers plus que défavorisés de Nouméa.

PLS
Pourquoi votre approche n'arrive-t-elle pas à s'imposer ?

S. B. : Parce qu'elle dérange. Elle remet en question certaines traditions qui ont l'âge de l'école.

Si on lisait les erreurs comme révélatrices non pas des difficultés des enfants, mais de problèmes didactiques et épistémologiques non encore élucidés, les choses avanceraient. Dans les nouveaux programmes, les mathématiques ont disparu du libellé des cinq compétences du socle commun. Au risque de leur faire perdre leur spécificité, elles sont ventilées sur ces cinq domaines, comme si on essayait de les rendre plus aimables au lieu de s'interroger sur la raison de leur disgrâce. Pour qu'inchiffrisme et innumérisme disparaissent du paysage scolaire, et sachant que tous les enfants, de quelque milieu qu'ils soient, aiment à faire marcher leur tête et leur imagination, pourquoi ne s'interroge-t-on pas plus profondément sur la nature de la matière à transmettre et sur la manière dont cela se fait ?

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

L'achat hors-ligne bientôt une activité de luxe !

Avec des coûts réduits, l'achat ou l'enseignement en ligne rendront-ils les mêmes activités hors-ligne prohibitives ?

Les frimas sont revenus et nous allons bientôt partir à la chasse aux cadeaux, au pas de charge, à perdre haleine, d'une boutique en ligne à une autre. À la même saison, l'homme du XX[e] siècle courait lui aussi d'une boutique à une autre, mais dans les rues verglacées et dans les allées des centres commerciaux.

En France, le commerce électronique représente aujourd'hui 7 % du commerce de détail sur l'année. Et les courses de Noël, 20 % de ces ventes en ligne. Les avantages de cette forme de commerce sont bien connus : l'effort physique moindre, l'offre plus vaste – essayez, par exemple, de trouver *L'homme invisible* de H. G. Wells dans une librairie de quartier –, la possibilité d'acheter un objet à toute heure du jour et de la nuit, le temps d'hésiter avant de se décider, les prix plus bas, etc. Et ses inconvénients également : le délai de livraison parfois long, l'impossibilité de voir, toucher, palper les objets avant de les acheter, etc.

Pour certains objets, tels les billets de train ou d'avion, les avantages priment, si bien que l'essentiel des ventes s'effectue désormais en ligne. Pour d'autres, ce sont plutôt les inconvénients qui dominent. Ainsi, nous préférons souvent acheter un steak tartare chez le boucher plutôt que de nous le faire livrer par la Poste trois jours plus tard.

L'un des avantages du commerce électronique, nous l'avons dit, est que les prix sont souvent plus bas que dans les boutiques en ville. Cela s'explique, en partie, par le coût élevé de ces boutiques : il faut payer un loyer, le salaire des vendeurs et immobiliser un stock important, qui risque en outre de rester invendu. Pour des objets volumineux ou qui se vendent à un faible débit, par exemple les meubles, ce coût, en valeur relative, est plus élevé encore. Ainsi, il n'est pas surprenant que le prix d'un canapé dans une boutique en ville soit plus élevé que celui de ce même canapé dans une boutique en ligne. Pourtant, un meuble est typiquement un objet

LE CHIFFRE D'AFFAIRES du commerce électronique français a progressé de 15 % au deuxième trimestre 2016, pour atteindre 12,4 milliards d'euros.

que nous aimons voir et toucher avant de l'acheter. Cela mène donc à une segmentation du marché : les meubles de luxe sont vendus en ville à des clients prêts à dépenser de l'argent pour qu'ils puissent les voir et les toucher avant de les acheter, et les meubles ordinaires sont vendus en ligne.

Ce phénomène présente de nombreuses similitudes avec l'évolution du spectacle vivant au moment de l'apparition du cinéma, puis de la télévision et de la diffusion de vidéos en ligne. Les coûts élevés d'un théâtre – le loyer du bâtiment, le cachet des comédiens, etc. – font qu'une place de théâtre coûte plusieurs dizaines d'euros, quand une place de cinéma n'en coûte que quelques-uns et la location d'un film en ligne presque rien. Et la différence est plus grande encore dans le cas d'un concert ou d'un opéra. Le spectacle vivant est ainsi devenu un luxe, ce qu'il n'était pas avant l'apparition du cinéma et du phonographe, en l'absence de concurrence. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les bruyants spectacles de théâtre de foire du XVII[e] siècle au silence compassé aujourd'hui de rigueur dans nos théâtres.

L'université devrait elle-même être bientôt concernée. Même dans les pays développés, suivre un enseignement a longtemps été un privilège réservé à un tout petit nombre. Il s'est ensuite démocratisé, mais, avec le développement de l'enseignement en ligne, une concurrence apparaît et suivre un cours donné par un professeur vivant redeviendra peut-être un jour un luxe : les étudiants suivront les cours ordinaires en ligne et ils iront de temps en temps à l'université.

Ainsi, courir d'une boutique à l'autre, voir et toucher les objets avant de les acheter, deviendront peut-être bientôt un luxe, comme le foie gras et le chapon. ■

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

Vous n'imaginez pas ce qui vous attend.

futuroscope

NOUVELLE ATTRACTION

19 nov. - 2 janv.
Séjour enfant
GRATUIT
jusqu'à 16 ans*

Nouvelle attraction L'Extraordinaire Voyage dès le 17 décembre 2016. *Pour 1 adulte payant plein tarif un séjour, dans un des hôtels du site sélectionnés, comprenant 2 jours ou plus de visite entre le 19/11/16 et le 02/01/17 inclus (selon calendrier d'ouverture), 1 enfant de 5 à 16 ans inclus bénéficie gratuitement du même séjour (hors prestations additionnelles) à condition qu'il partage la chambre de l'adulte payant. Offre, hors frais de gestion, hors assurance annulation et hors taxe de séjour, non cumulable, non rétroactive et sous réserve de disponibilités. SA Futuroscope Destination, capital 300 000 €, Parc du Futuroscope BP 3030 86130 Jaunay-Clan - RCS Poitiers B400 857 090 - Immatriculation IM086100013. Cube Creative/B.Comtesse/ Brune/Futuroscope.

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner

Des énigmes pas si anodines

Certaines devinettes s'appuient sur l'usage statistique que, inconsciemment, nous faisons de la langue. Il faut s'affranchir de ce conditionnement pour les résoudre.

Tout le monde connaît ce type de petite énigme qui peut distraire les convives autour d'un repas : « Je peux tourner sans bouger : que suis-je ? » Supposons que vous y pensiez un moment avant de vous jeter sur la réponse. Si vous ne connaissiez pas déjà cette devinette, il est probable qu'elle vous a un peu déconcerté… « Tourner sans bouger », cela paraît contradictoire. Tout l'amusement repose là-dessus, bien entendu.

En réalité, l'incommodité que nous ressentons vient d'un usage statistique de la langue. En d'autres termes, lorsque nous utilisons le verbe « tourner », c'est en général pour désigner quelque chose qui est en mouvement (la Terre, une toupie, un derviche…). Nous ne saurions en établir un calcul clair, mais une technique d'échantillonnage implicite savonne la pente d'une difficulté intellectuelle sur laquelle mise le concepteur de l'énigme. Comment s'en sortir ? Toujours de la même façon avec ce type d'énigme : en se demandant quel autre usage on peut faire du verbe « tourner ». On peut tourner un film par exemple, mais le lait aussi peut tourner… et voilà que nous trouvons la bonne réponse à l'énigme.

Sans en avoir l'air, la confusion mentale que nous ressentons dans ce cas révèle un fonctionnement très profond de notre cerveau et sa façon d'apprendre. La langue en est justement un exemple parfait. Ainsi, en 1998, les psychologues cognitifs Sébastien Pacton, Michel Fayol et Pierre Perruchet ont étudié avec des élèves de classe de CE2 comment certaines règles du langage pouvaient être connues des plus jeunes sans qu'ils les aient apprises (S. Pacton *et al.*, « Acquérir l'orthographe du français : apprentissages implicite et explicite », dans A. Florin et J. Morais [éd.], *La maîtrise du langage*, Presses Universitaires de Rennes, pp. 95-118, 2002). « Comment écririez-vous les mots se prononçant *barivo* et *barilo* ? », leur ont-ils notamment demandé.

EN FRANÇAIS, LE SON /VO/ s'écrit le plus souvent « veau ». Un enfant l'apprend inconsciemment assez vite.

Ces deux mots n'existent pas dans la langue française. L'orthographe choisie allait-elle être aléatoire ? Non. Parmi toutes les façons d'écrire en français le son /o/ – « o », « au », « eau », etc. –, la graphie « eau » choisie par les élèves de CE2 pour le mot *barivo* est aussi celle qui s'impose dans 62,5 % des cas après un *v* (par exemple « caniveau »), alors qu'elle n'est présente que dans 4,4 % des cas après la lettre *l* (comme dans « rouleau »). Ces élèves, sans en avoir pleinement conscience, ont appliqué une règle implicite apprise par fréquentation de régularités.

C'est cette même règle qui nous conduit à être troublés lorsque nous lisons les énigmes : « J'ai deux jambes, mais je ne marche pas », « Je réfléchis sans réfléchir ». Les deux réponses – un pantalon et un miroir – révèlent, là aussi, l'usage statistique que nous faisons de la langue. Afin de résoudre ce type d'énigmes, il faut donc repérer la polysémie d'un terme et en examiner les différents usages possibles, pour révéler celui qui fait disparaître les anomalies de l'énoncé.

La procédure nous permet de revenir sur notre jugement initial du cadre mental qui s'impose naturellement dans la compréhension d'un énoncé, donc de nous libérer de l'emprise intellectuelle qui résulte de l'apprentissage de la langue et de révéler la formidable plasticité de notre esprit. Ainsi, alors que cette réalité du langage s'est installée en nous après un nombre colossal d'expériences, il n'est pas impossible de s'affranchir de ce qui pourrait être un esclavage cognitif.

Cette emprise peut aussi résulter d'une forme d'énoncé qui a de fortes chances d'être interprété de façon erronée. Ainsi, pour conclure en beauté, voici une dernière petite énigme fondée sur le même ressort : « Je commence par un *e*, je termine par un *e*, pourtant je ne contiens qu'une lettre… et je ne suis pas la lettre *e* ». Là encore, cherchez la polysémie et vous trouverez la solution *(indiquée verticalement dans la marge de ce texte)*.

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

À Toulouse & sur internet
laclefdesetoiles.com

La Clef des ETOILES

ASTRONOMIE
Télescopes, Lunettes, Jumelles
géantes, Astrophotographie

OBSERVATION NATURE
Jumelles, Longues-vues, Trépieds,
Digiscopie

IMAGERIE
Caméras CCD, Caméras vidéos,
Adaptation APN, Autoguidage,
Spectroscopie, Logiciels

LIBRAIRIE & CADEAUX
Météorites, Globes terrestres, Globes
planétaires, Bijoux solaires, Posters

La Clef des ÉTOILES
Sur Internet > www.laclefdesetoiles.com
À Toulouse > 3 rue Romiguières 31000 TOULOUSE
Email > contact@laclefdesetoiles.com
Téléphone > 05 61 22 58 55 Fax > 05 61 22 62 57

Astrophysique

L'endroit le plus vide

En cherchant à expliquer pourquoi une zone de l'Univers est anormalement froide, des astrophysiciens ont découvert une vaste région où la matière se fait rare.

István Szapud

de l'Univers

Afin d'apercevoir la lumière la plus ancienne de l'Univers, il suffit de régler un vieux poste de télévision entre deux chaînes : les minuscules points qui dansent sur l'écran correspondent au fait que l'antenne est bombardée en permanence par des photons dont certains ont été émis environ 380 000 ans après le Big Bang, il y a quelque 13,8 milliards d'années. Ces photons volent à travers l'espace dans toutes les directions, et correspondent à une température moyenne de 2,7 kelvins (–270,45 °C). Ils forment le fond diffus cosmologique. La carte bidimensionnelle de ce rayonnement est en quelque sorte la première photographie de l'Univers, dans sa prime jeunesse.

Cette photo présente de petites imperfections. La température fluctue d'environ 10^{-5} à 10^{-4} kelvin autour de la valeur moyenne. On parle d'anisotropies du fond diffus. Ainsi, certaines régions de la carte semblent un peu plus froides, d'autres plus chaudes. Les cosmologistes analysent ces anisotropies pour déterminer certaines caractéristiques de l'Univers primordial.

Plus grave, la carte du fond diffus cosmologique souffre aussi d'anomalies que les théories cosmologiques standard ne peuvent expliquer entièrement. La plus grande de ces anomalies, initialement repérée en 2004 sur la carte du fond diffus établie par la sonde WMAP *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)*, est le « point froid », une zone du ciel couvrant environ vingt fois la largeur de la pleine lune, où les photons sont inhabituellement froids. Pour certains, cette structure casse la majestueuse symétrie du fond diffus ; pour d'autres, elle met en valeur les traits de l'Univers et ajoute à son mystère. Je fais partie du second camp : dès sa découverte, cette anomalie et ce qu'elle cache m'ont fasciné.

Cette énigme a suscité beaucoup de débats parmi les chercheurs. Une première explication est tout simplement qu'elle serait le fruit du hasard, une accumulation fortuite de photons froids sans cause spécifique. Par analogie, cette idée revient à tirer dix fois de suite pile avec une pièce non truquée : la probabilité est faible, mais non nulle. Dans le cas du point froid, la probabilité que le hasard en soit à l'origine est faible, de l'ordre de 0,5 %. D'autres explications ont été proposées, des plus triviales aux plus fantaisistes, allant de problèmes techniques avec les instruments qui analysent le cosmos à la suggestion que la région froide serait un portail vers un autre univers ou vers des dimensions cachées.

En 2007, avec d'autres astrophysiciens, nous avons proposé l'idée qu'un tel point

CE NUAGE MOLECULAIRE opaque masque la lumière venant de l'arrière-plan. La tache noire qu'il crée donne l'illusion d'une zone vide dans l'Univers. Mais c'est bien une véritable région cosmique vide que traquent les astrophysiciens.

L'AUTEUR

István SZAPUDI est chercheur à l'Institut d'astronomie de l'université d'Hawaï. Il étudie la cosmologie et la structure de l'Univers aux grandes échelles.

L'ESSENTIEL

- Le fond diffus cosmologique – la lumière émise par l'Univers à l'âge de 380 000 ans – présente un étrange « point froid », une zone où la température associée aux photons est inférieure à la moyenne.
- Une explication possible serait une vaste région d'espace relativement vide. La lumière qui la traverserait aurait tendance à perdre de l'énergie (devenir plus froide) à cause d'un effet produit par l'expansion accélérée de l'Univers.
- Les astronomes ont récemment découvert un tel supervide s'étendant sur 1,8 milliard d'années-lumière et aligné avec le point froid.

froid pouvait se former s'il existait dans la même région du ciel un supervide, c'est-à-dire une vaste région d'espace relativement dépourvue de matière et de galaxies. Ce vide serait le lieu le plus vide de l'espace, un désert gigantesque entouré d'un environnement plus dense. Depuis, mes collègues de l'université d'Hawaï et moi-même avons confirmé l'existence du vide, et nous avons trouvé des indices tendant à prouver qu'il pourrait bien rendre compte du point froid.

La traversée d'un vide

Nous en sommes venus à envisager l'existence d'un supervide en considérant la manière dont nous pensons que la lumière interagit avec les vides plus petits. Le supervide postulé serait extrême, mais les vides ordinaires de taille moyenne (des zones contenant relativement peu de galaxies) sont assez répandus dans l'Univers. C'est aussi le cas de leurs contraires, les amas, qui sont de grandes congrégations rassemblant jusqu'à un millier de galaxies.

Les cosmologistes pensent que les germes des vides et des amas sont apparus très tôt dans l'Univers, quand des processus quantiques aléatoires ont produit une légère surdensité de matière dans certaines parties de l'espace et une sous-densité dans d'autres. La masse plus importante des régions de surdensité a produit une attraction gravitationnelle plus forte qui a attiré davantage de matière vers elles au fil du temps, au détriment des régions de sous-densité. Les premières ont fini par devenir des amas, et les secondes des vides.

Pour comprendre l'effet de ces vides contenant peu de matière sur la lumière qui les traverse, partons d'une analogie. Ces vides se comportent avec tout ce qui les traverse comme des collines parcourues par une balle *(voir l'encadré pages 28 et 29)*. Dans un premier temps, quand une particule pénètre dans le vide, elle s'éloigne de régions environnantes de densité supérieure qui exercent une force gravitationnelle tendant à la retenir. Elle ralentit comme une balle qui roulerait en remontant la pente. Dans un second temps, alors que la particule commence à sortir du vide, elle se rapproche de zones denses qui l'attirent. La particule accélère comme une balle dévalant la colline.

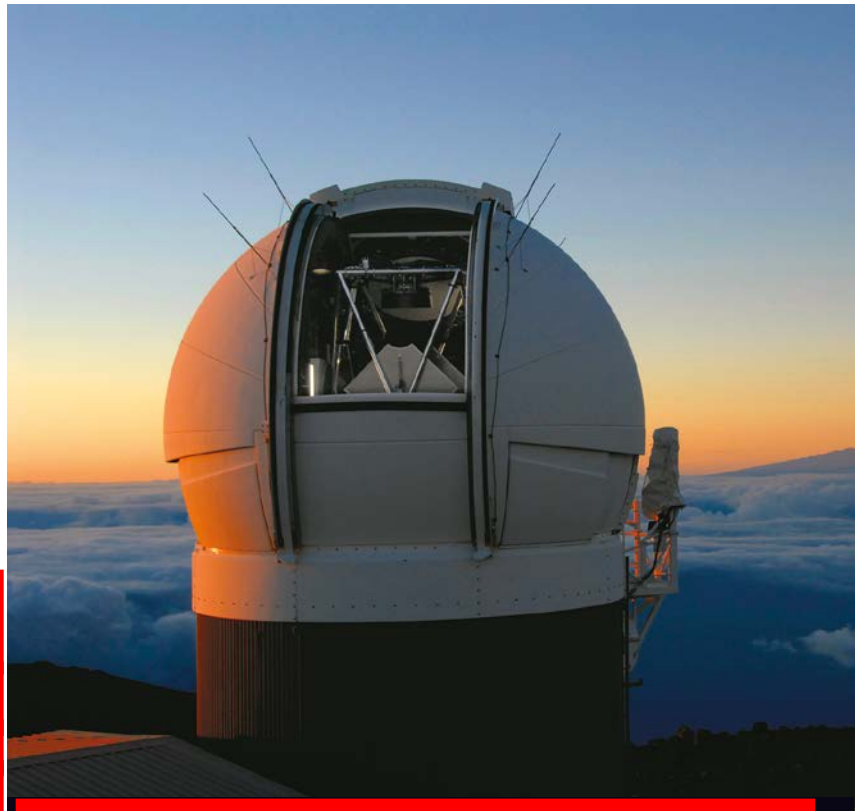
Les photons du fond diffus se comportent de manière analogue, sans pour autant changer de vitesse (la vitesse de la lumière est toujours constante) : ils perdent de l'énergie puis en gagnent, ce qui se traduit par une variation de leur longueur d'onde, qui est directement proportionnelle à leur température. Quand un photon pénètre dans un vide, il grimpe la colline et perd de l'énergie, en d'autres termes il se refroidit. En descendant la colline de l'autre côté, le photon récupère son énergie. Par conséquent, il arriverait de l'autre côté avec la même température qu'il avait au départ... si l'Univers était statique ou en expansion constante (auquel cas l'effet serait infime).

Or ce n'est pas le cas. Depuis les travaux d'Edwin Hubble, il est clair que l'Univers est en expansion. Mais ces deux dernières décennies, grâce à l'étude des supernovæ de type Ia (des explosions d'étoiles particulières), les chercheurs ont découvert que cette expansion accélère. La plupart des cosmologistes attribuent cette accélération à l'énergie sombre, un élément de nature inconnue présent dans tout l'espace qui semble contrer l'attraction gravitationnelle.

L'accélération de l'Univers complique le scénario de la colline : dans la perspective de notre photon du fond diffus, cela signifie que pendant qu'il traverse le vide, celui-ci s'est agrandi, mais aussi tout l'espace qui l'entoure. En d'autres termes, quand le photon arrive de l'autre côté, il trouve un espace de densité énergétique inférieure à celle qu'il avait quittée en entrant dans le vide, ce qui revient à dire que la plaine entourant la colline s'est surélevée, de telle sorte que le sol plat de l'autre côté est désormais plus haut que ne l'était le sol du côté de départ. Par conséquent, le photon ne récupère pas toute l'énergie qu'il a perdue en grimpant la colline.

L'effet net est que les photons du fond diffus perdraient de l'énergie en traversant un vide. Et nous verrions donc des régions plus froides dans le fond diffus cosmologique près des régions de faible densité. Ce phénomène est nommé effet Sachs-Wolfe intégré. L'effet s'applique aussi aux superamas, mais dans ce cas, les photons gagnent de l'énergie en traversant de vastes régions contenant un supplément de masse et sont donc un peu plus chauds.

L'effet Sachs-Wolfe intégré est normalement infime. Même pour de grands vides, il occasionne typiquement des variations de température inférieures aux fluctuations moyennes du fond diffus. Or celles-ci, dues aux légères différences de densité au sein de l'Univers naissant – au moment où la lumière a été émise –, ne varient guère



LES RELEVÉS DU CIEL par le télescope PS1 du projet Pan-STARRS *(Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)*, à Hawaï, ont permis aux astronomes d'identifier une immense étendue d'espace relativement vide (un « supervide ») qui expliquerait la présence d'un énigmatique point froid dans la lumière la plus ancienne de l'Univers.

plus que de une partie pour 10 000. Mais nous avons réalisé que dans le cas d'un vide véritablement énorme, un supervide, la différence suffirait à produire le point froid. Trouver un supervide dans la région du point froid permettrait d'expliquer ce dernier. Mais pas uniquement ; nous aurions une preuve, différente de l'observation des supernovæ, de l'accélération de l'expansion de l'Univers, car l'effet Sachs-Wolfe intégré n'est notable que dans cette situation.

La chasse au supervide

Les astronomes ont commencé à chercher un supervide coïncidant avec le point froid en 2007. La détection d'une structure aussi vaste est plus difficile qu'il n'y paraît. La plupart des relevés astronomiques produisent des images bidimensionnelles du ciel, sans données sur la distance des objets observés. Les galaxies que nous voyons pourraient aussi bien être toutes regroupées, ou très espacées, le long de la ligne de visée. Les astronomes doivent donc recueillir des informations supplémentaires sur chaque galaxie pour estimer sa distance, une tâche laborieuse et d'un coût souvent prohibitif.

En 2007, à partir du catalogue NVSS *(NRAO VLA Sky Survey)* de galaxies, Lawrence Rudnick, de l'université du Minnesota, et ses collaborateurs ont découvert qu'une région de l'espace à peu près alignée avec le point froid contient moins de galaxies que la moyenne. Bien que le catalogue NVSS ne comporte pas de données concernant les distances spécifiques des galaxies du relevé, les astronomes savaient que la plupart des galaxies NVSS sont très éloignées de nous. Sur la base de ces données, ils ont émis l'hypothèse qu'un supervide se trouverait à 11 milliards d'années-lumière.

Cette distance posait une difficulté : la lumière qui nous parvient maintenant aurait traversé ce supervide lointain il y a près de 8 milliards d'années. (Cette traversée ne remonte pas à 11 milliards d'années car il faut prendre en compte que l'Univers a doublé de taille depuis que la lumière a été émise.) À une époque cosmique aussi reculée, l'énergie sombre ne représentait qu'une composante mineure de l'Univers – d'abord dominé par le rayonnement, puis la matière – et donc influait beaucoup moins sur la dynamique cosmique qu'aujourd'hui, et l'effet Sachs-Wolfe intégré était trop faible pour produire le point froid.

Les travaux de Lawrence Rudnick, même s'ils n'ont pas confirmé le scénario imaginé, ont retenu mon attention. Avec Ben Granett et Mark Neyrinck, alors respectivement étudiant en thèse et postdoctorant à l'université d'Hawaï, nous avons mené une analyse statistique afin de déterminer si des petites structures du fond diffus (des zones relativement chaudes ou froides, mais moins extrêmes que le point froid) coïncidaient souvent avec de petits amas ou des vides connus de l'Univers. Nous avons trouvé que ces recouvrements étaient fréquents. Même si aucune de ces structures connues ne correspondait au point froid, les résultats nous ont convaincus de poursuivre la recherche d'un supervide dans la direction du point froid.

Nous avons alors utilisé le télescope du CFHT (Observatoire Canada-France-Hawaï) pour cibler plusieurs petites zones du ciel dans la région du point froid et nous avons compté le nombre de galaxies à l'intérieur de chacune d'elles. Nous avons effectué ces observations début 2010, mais nous n'avons pas trouvé de signe de supervide à la distance prédite par Lawrence Rudnick. Nous avons même exclu la présence d'un supervide au-delà d'environ trois milliards d'années-lumière. Grâce à d'autres observations, Malcolm Bremer, de l'université de Bristol, en Angleterre, et ses collaborateurs sont arrivés à la même conclusion. Et dans le même temps, l'incertitude statistique des résultats de Lawrence Rudnick, réévaluée par des pairs, s'est révélée beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Ainsi, pendant un moment, nous nous sommes demandé s'il fallait abandonner l'idée d'expliquer le point froid par l'effet Sachs-Wolfe intégré.

Mais il restait un petit espoir ! Dans nos données, un indice suggérait la possibilité qu'un supervide se trouve plus près de nous. Paradoxalement, il est plus difficile de trouver un supervide proche avec les données du CFHT : chaque zone observée est un cône dont nous constituons le sommet et qui s'élargit à mesure que l'on regarde loin. Plus la distance est grande et plus la région physique couverte est vaste, ce qui nous a permis d'avoir un décompte précis des galaxies des zones éloignées. Mais près de nous, l'aire couverte est petite et, par conséquent, la marge d'erreur plus

mportante. Il y avait ainsi seulement 75 % de hances que le faible nombre de galaxies btenu à courte distance corresponde à un upervide – un résultat insuffisamment iable selon les critères scientifiques. Pour rancher la question, il fallait observer une one beaucoup plus grande, couvrant toute a région du point froid. À l'époque, les élescopes à notre disposition ne nous le permettaient pas. Depuis, Ben Granett a btenu son doctorat et travaille maintenant à l'observatoire astronomique de Brera en talie, et Mark Neyrinck est parti à l'uni-versité Johns-Hopkins.

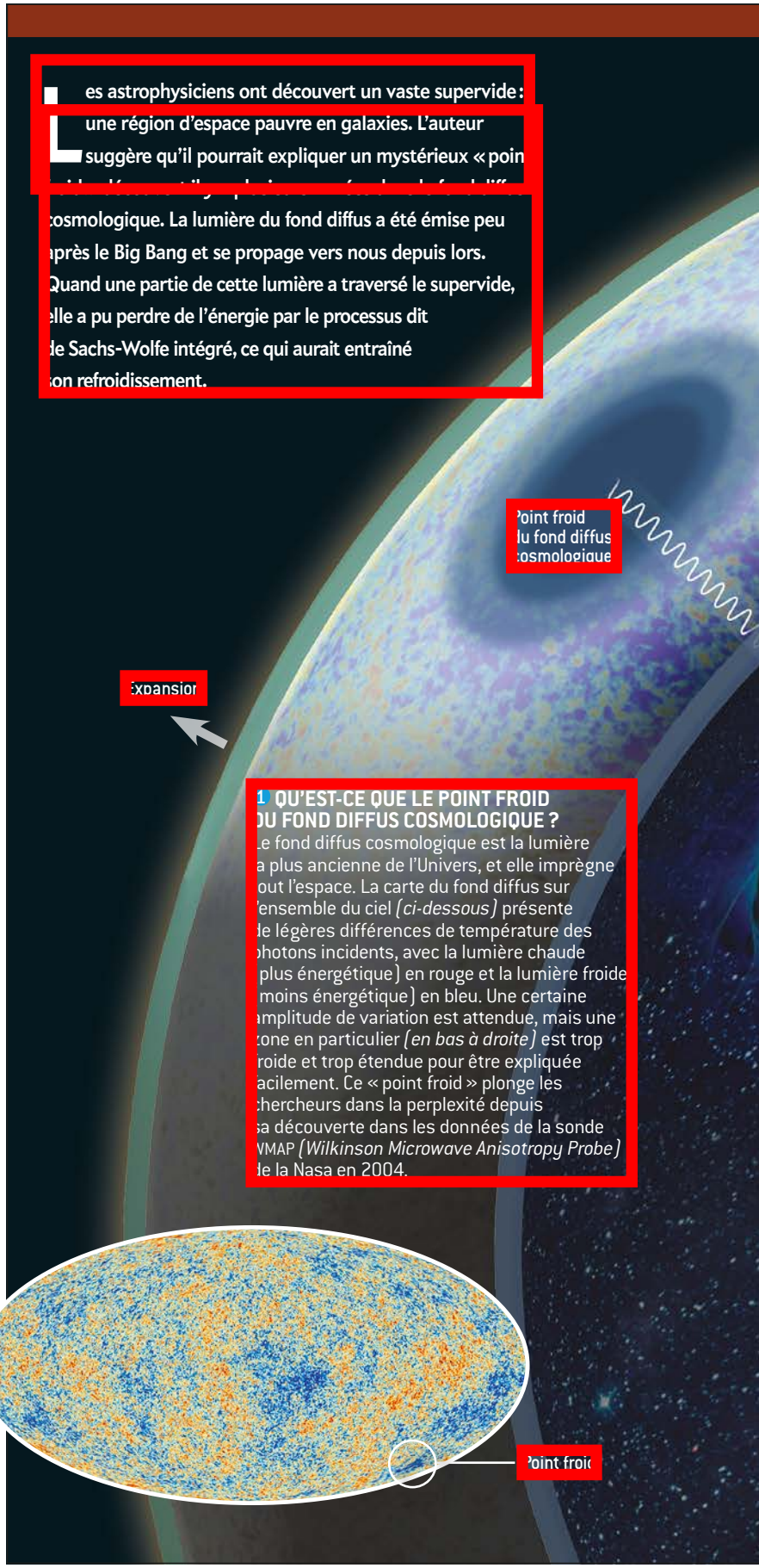
Une heureuse percée

Par chance pour moi, je n'ai pas attendu rop longtemps pour obtenir de nouvelles données. Au moment où je disais au revoir à mes collègues, l'Institut d'astronomie de l'université d'Hawaï achevait la construction d'un nouveau télescope : PS1, le premier observatoire du projet Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, télescope de relevé panoramique et système de réponse rapide). C'était exactement ce dont j'avais besoin. Équipé de la plus grande caméra du monde avec 1,4 gigapixel, le télescope est situé à 3 000 mètres d'altitude au sommet du volcan Haleakalā, sur l'île de Maui.

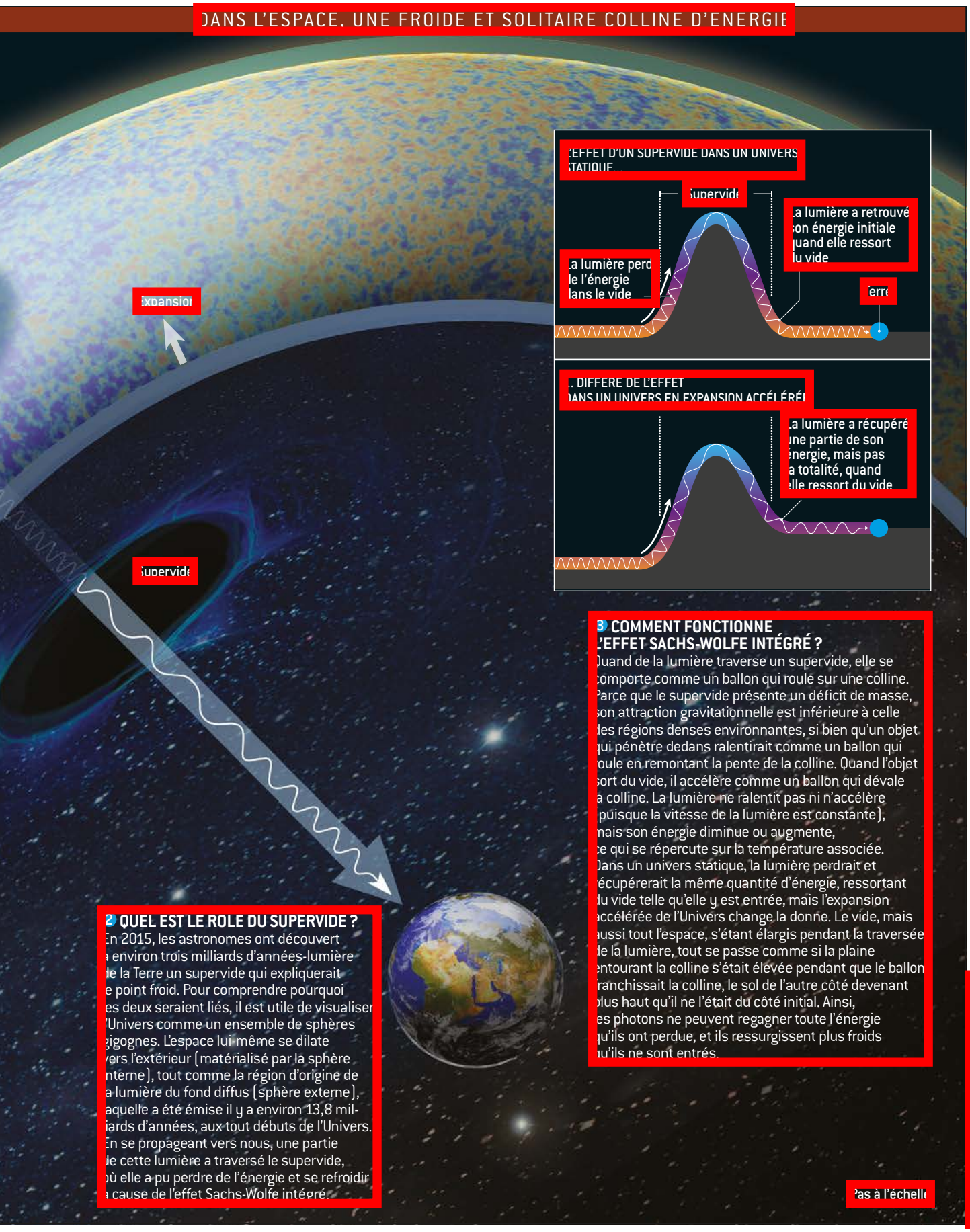
En mai 2010, au sein d'un consortium rassemblant plusieurs autres universités, mes collègues et moi avons commencé à cartographier les trois quarts du ciel à l'aide de PS1. Je me rappelle avoir essayé de convaincre Nick Kaiser, alors responsable scientifique de Pan-STARRS, que nous devions cartographier la région du point froid avant toute autre chose, dès la mise en service de l'instrument. Même si cela ne s'est pas fait, la région faisait partie de la zone observée durant les premières années de service du télescope, et les mesures dont j'avais besoin allaient arriver peu à peu.

Tandis que nous attendions avec impatience ces nouvelles données, j'ai commencé à travailler avec un étudiant, András Kovács, sur les données publiques des observations du fond diffus par les satellites *Planck* et WMAP, ainsi que sur les données du satellite WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) portant sur des galaxies récemment observées en lumière infrarouge.

András Kovács étudiait à l'université Loránd Eötvös, à Budapest. Nous avions des téléconférences hebdomadaires et, à



DANS L'ESPACE, UNE FROIDE ET SOLITAIRE COLLINE D'ENERGIE



2 QUEL EST LE ROLE DU SUPERVIDE ?

En 2015, les astronomes ont découvert à environ trois milliards d'années-lumière de la Terre un supervide qui expliquerait ce point froid. Pour comprendre pourquoi les deux seraient liés, il est utile de visualiser l'Univers comme un ensemble de sphères gigognes. L'espace lui-même se dilate vers l'extérieur (matérialisé par la sphère interne), tout comme la région d'origine de la lumière du fond diffus (sphère externe), laquelle a été émise il y a environ 13,8 milliards d'années, aux tout débuts de l'Univers. En se propageant vers nous, une partie de cette lumière a traversé le supervide, où elle a pu perdre de l'énergie et se refroidir à cause de l'effet Sachs-Wolfe intégré.

3 COMMENT FONCTIONNE L'EFFET SACHS-WOLFE INTÉGRÉ ?

Quand de la lumière traverse un supervide, elle se comporte comme un ballon qui roule sur une colline. Parce que le supervide présente un déficit de masse, son attraction gravitationnelle est inférieure à celle des régions denses environnantes, si bien qu'un objet qui pénètre dedans ralentirait comme un ballon qui roule en remontant la pente de la colline. Quand l'objet sort du vide, il accélère comme un ballon qui dévale la colline. La lumière ne ralentit pas ni n'accélère (puisque la vitesse de la lumière est constante), mais son énergie diminue ou augmente, ce qui se répercute sur la température associée. Dans un univers statique, la lumière perdrait et récupérerait la même quantité d'énergie, ressortant du vide telle qu'elle y est entrée, mais l'expansion accélérée de l'Univers change la donne. Le vide, mais aussi tout l'espace, s'étant élargis pendant la traversée de la lumière, tout se passe comme si la plaine entourant la colline s'était élevée pendant que le ballon franchissait la colline, le sol de l'autre côté devenant plus haut qu'il ne l'était du côté initial. Ainsi, les photons ne peuvent regagner toute l'énergie qu'ils ont perdue, et ils ressurgissent plus froids qu'ils ne sont entrés.

Pas à l'échelle

ause du décalage de douze heures entre Honolulu et Budapest, nos conversations se poursuivaient souvent tard dans la nuit européenne. Au cours d'une de ces sessions, je lui ai demandé de trouver les plus grandes régions de basse densité, ou vides, dans le catalogue WISE de galaxies. Quelques jours plus tard, il m'a envoyé un courriel avec les images et les coordonnées des plus grands vides du catalogue. En lisant son message, j'ai remarqué que l'un des vides qu'il avait repérés coïncidait avec la région du ciel où se trouve le point froid. Or je n'avais pas encore parlé à András Kovács de mon intérêt pour un lien éventuel entre un supervide et le point froid. Sa découverte ne pouvait donc pas être biaisée par l'espoir d'établir ce lien. Parce que WISE observe un grand nombre de galaxies plus proches que NVSS, nous avions là un second indice que peut-être nous devrions chercher le supervide à proximité.

Il nous restait donc à confirmer que nous tenions là un supervide. Plusieurs années ont été nécessaires pour rassembler les données des différents programmes d'observation et établir de façon certaine la découverte. Nous avons utilisé un ensemble de données provenant de WISE, de Pan-STARRS et de 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*, relevé de tout le ciel à deux micromètres).

Mais nous avions besoin d'attribuer des distances aux galaxies observées. Une manière de les mesurer est d'observer le « décalage vers le rouge » d'un objet lorsqu'une source lumineuse s'éloigne de l'observateur, sa lumière est détectée avec un décalage vers de plus grandes longueurs d'onde, vers le rouge dans le cas du spectre visible). Plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne vite de nous, et plus son décalage vers le rouge est important. Même si nous ne disposions pas de mesures précises de décalage vers le rouge pour les galaxies, nous pouvions suffisamment bien l'estimer pour attribuer une distance à chacune d'elles dans la direction du point froid. Nous avons créé une série de tranches tomographiques: des images planes de l'Univers correspondant à différentes

LA RECHERCHE D'UN SUPERVIDE

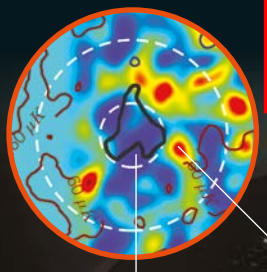
La recherche d'un supervide nécessite d'établir une carte en trois dimensions de la [illegible] les galaxies à la même distance 2 et d'y chercher les régions de faible densité 3.

1 MESURER LES DISTANCES

Les astronomes ont analysé le catalogue de galaxies du satellite WISE et du projet Pan-STARRS. Ce catalogue indique la position des galaxies sur l'ensemble du ciel, mais pas leur distance, un paramètre indispensable pour établir une carte tridimensionnelle de la distribution des galaxies. Pour évaluer leur distance, les chercheurs ont analysé les couleurs optiques de chaque galaxie, ce qui a fourni, pour chacune, une estimation du degré de décalage vers le rouge que sa lumière a subi. Cet effet est la conséquence de l'expansion de l'Univers : quand l'espace s'étire pendant que la lumière le traverse, la longueur d'onde des photons de lumière s'étire elle aussi. Plus le décalage vers le rouge d'une galaxie est important, plus elle est éloignée de la Terre. En combinant les positions des galaxies sur le ciel avec leurs distances estimées, les astronomes ont créé une carte tridimensionnelle de la densité de galaxies dans la direction du point froid.

2 DECOUPER L'UNIVERS EN TRANCHES

Les chercheurs ont décomposé leur carte tridimensionnelle de densité en une série de tranches montrant la répartition des galaxies à différentes distances de la Terre. Pour chaque tranche, les zones rouges correspondent aux régions denses avec beaucoup de galaxies et les régions bleues, aux zones plutôt vides. Le contour noir au centre correspond au point froid dans le fond diffus cosmologique.



Dense / en rouge

Vide / en bleu

2,9 milliards d'années-lumière

Fond diffus cosmologique

Tranche 3

Tranche 2

Tranche 1

3 COMPARER LES TRANCHES

Les astronomes ont créé des cartes montrant la densité des galaxies dans trois plages de distances : jusqu'à 1,24 milliard d'années-lumière de distance *(a)*, entre 1,5 et 1,9 milliard d'années-lumière *(b)* et entre 2,3 et 2,9 milliards d'années-lumière *(c)*. La tranche la plus proche ne révèle pas de vide, et la plus lointaine semble indiquer un petit vide un peu trop excentré pour correspondre au point froid. Mais la tranche du milieu révèle une vaste zone vide essentiellement centrée sur le point froid.

Pas à l'échelle

distances à la Terre. Le premier jeu d'images révélait un supervide approximativement sphérique et plus poussé près du centre. Ce vide géant se cache très près de nous, à environ trois milliards d'années-lumière, ce qui explique pourquoi il a été si difficile à mettre en évidence lors de nos premiers essais de détection.

Après plusieurs mois d'analyse, nous étions convaincus d'avoir des preuves solides de l'existence du supervide. En d'autres termes, nous étions certains de l'existence d'une région de basse densité dans la direction du point froid. Ce supervide est même énorme ; avec 1,8 milliard d'années-lumière de diamètre, c'est peut-être la plus grande structure jamais identifiée. L'objet est probablement très rare : les théories cosmologiques suggèrent qu'il n'y en aurait tout au plus que quelques autres dans tout l'Univers observable.

Nous avions enfin trouvé notre supervide aligné avec la plus grande anomalie du fond diffus cosmologique, le point froid. L'énigme était-elle donc résolue ? Pas tout à fait. Le supervide et le point froid pouvaient être alignés par hasard, sans lien de cause à effet, même si, d'après nos calculs, une telle coïncidence était 20 000 fois moins probable que la possibilité que le supervide ait créé le point froid.

Un supervide pas encore assez grand ?

Cependant, nous avons un problème plus sérieux. Bien que le supervide soit au bon endroit pour expliquer le point froid, il n'a pas exactement la bonne taille. Pour rendre compte de la température du point froid, bien plus basse que la température moyenne du fond diffus, le supervide devrait être encore plus grand qu'il ne semble l'être, peut-être d'un facteur deux à quatre. Ce désaccord entre la théorie et les observations est si important que certains chercheurs pensent que le chevauchement du supervide avec la région du point froid est un pur hasard. Et que d'autres explications sont donc à chercher, comme la possibilité que les galaxies émettent moins de rayonnement dans l'espace que nous ne le supposons, ce qui crée des biais dans la carte du fond diffus cosmologique – un phénomène qui pourrait, dans une certaine mesure, imiter l'effet Sachs-Wolfe intégré. Par ailleurs, même si nos observations prouvent l'existence du supervide, nous ne pouvons pas connaître sa taille, sa forme et sa position avec assez de précision pour calculer en détail les effets qu'il devrait avoir sur le fond diffus. En particulier, le supervide pourrait être allongé dans notre direction, ou composé de plusieurs vides sphériques juxtaposés et alignés dans la direction du point froid (comme un bonhomme de neige) – autant de configurations qui influent sur l'effet Sachs-Wolfe intégré. Ainsi, nous ne savons pas encore dans quelle mesure la taille du supervide met en difficulté notre théorie.

Nous avons déjà prévu de recommencer notre étude avec les nouvelles données de PS1, plus complètes que celles que nous avons utilisées précédemment, et en utilisant des observations que les astronomes ont encore affinées. Nous pourrons alors quantifier l'écart entre les mesures et la théorie afin de déterminer si l'hypothèse de l'effet Sachs-Wolfe intégré et du supervide est à écarter définitivement. Une étude menée par Seshadri Nadathur et Robert Crittenden, de l'université de Portsmouth, en Angleterre, suggère, grâce à des données récentes du *Sloan Digital Sky Survey*, que notre supervide ne peut pas expliquer le point froid.

Si le désaccord devait persister, il pourrait être révélateur d'un phénomène d'une autre nature. Par exemple, il existe des théories alternatives à la relativité générale d'Einstein dont certaines se manifestent par une signature unique qui n'apparaîtrait que dans les vides. Si l'une de ces théories est celle qui décrit correctement la force gravitationnelle, le mécanisme Sachs-Wolfe intégré pourrait opérer différemment. Notre supervide nous offrirait un indice allant dans le sens de ces théories. Nous aurions là une piste passionnante pour comprendre l'Univers à un niveau plus profond qu'il n'est possible aujourd'hui.

Dans tous les cas, la découverte des supervides est cruciale. Et les prochaines années devraient nous en apprendre encore davantage sur eux – et donc sur la nature de l'Univers. ■

Le supervide nous permettrait de tester des théories alternatives à la relativité générale

BIBLIOGRAPHIE

I. Szapudi *et al.*, **Detection of a supervoid aligned with the cold spot of the cosmic microwave background**, *MNRAS*, vol. 450, n° 1, pp. 288-294, 2015.

C. Deffayet, **Energie sombre ou gravité modifiée ?**, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

S. Starkman et D. Schwartz, **L'Univers est-il désaccordé ?**, *Pour la Science*, n° 335, septembre 2005.

« Avec les vides cosmiques, nous testerons bientôt divers modèles d'énergie sombre »

Les régions les plus vides de l'Univers cachent de nombreuses informations sur l'évolution du cosmos et sur l'énergie sombre. Stéphanie Escoffier nous explique comment les catalogues les plus récents de galaxies commencent à ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

Stéphanie ESCOFFIER est chargée de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille et membre de la collaboration BOSS.

POUR LA SCIENCE
Pour commencer, qu'est-ce qu'un vide cosmique et comment se forme-t-il ?

STÉPHANIE ESCOFFIER : En vertu du principe cosmologique, l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire identique quel que soit l'endroit où l'on se place ou la direction dans laquelle on regarde. Si on regarde de plus près, ce n'est pas le cas, l'Univers semble composé de grandes structures : les galaxies se regroupent en amas et superamas, formant eux-mêmes de grands filaments. Entre ces structures, on trouve les « vides » cosmiques, d'immenses espaces pratiquement déserts où la densité en galaxies est très faible. La taille des vides est variable, du supervide énorme de plus de un milliard d'années-lumière de rayon, à des tout petits. Je travaille principalement sur des vides de 50 à 400 millions d'années-lumière de rayon.

L'origine des vides se cache dans le plasma de l'Univers primordial. Des fluctuations quantiques qui s'y manifestaient ont créé des zones de surdensité de matière, où la matière ordinaire et la matière noire (dont la nature est encore inconnue) se sont accumulées et ont donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les zones de sous-densité de matière ont formé les vides cosmiques.

PLS
Comment les détecte-t-on ?

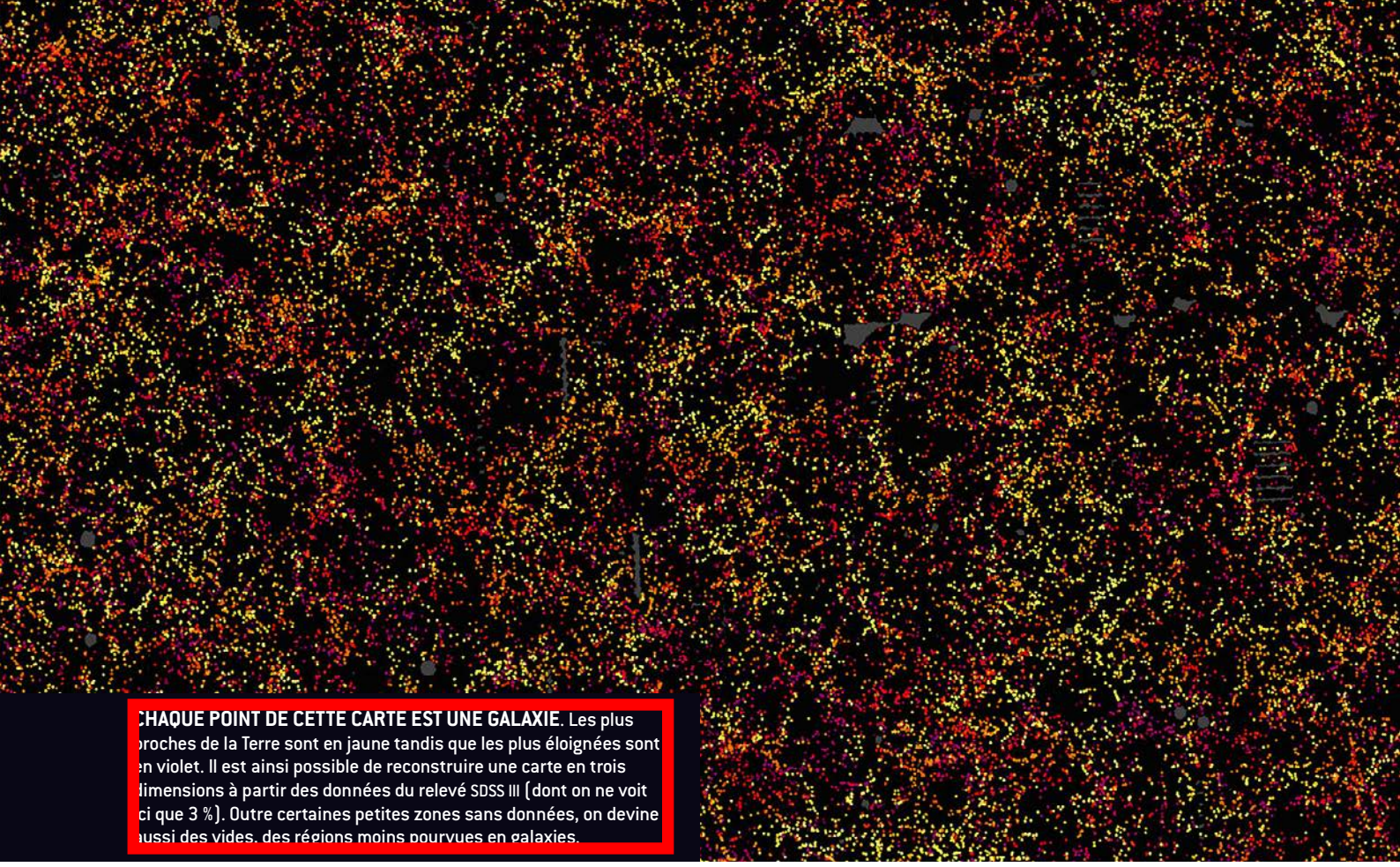
S. E. : Les premiers ont été découverts en 1978 par Stephen Gregory et Laird Thompson, de l'observatoire américain de Kitt Peak. Les vides sont définis à partir des amas et des filaments qui les cloisonnent, donc nous avons besoin de catalogues de galaxies relevées sur un vaste champ du ciel. Nous appliquons alors un algorithme qui isole et recense les vides. Mon équipe utilise la carte tridimensionnelle la plus riche en galaxies, qui est celle du programme *BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)* lié au relevé SDSS III *(Sloan Digital Sky Survey)*, réalisé avec un télescope de 2,5 mètres de diamètre situé au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Le relevé a été effectué entre 2009 et 2014 et comprend 1,5 million de galaxies. Nous y avons détecté plusieurs centaines de vides.

PLS
Quelles informations les vides cosmiques apportent-ils dans l'étude de l'Univers ?

S. E. : Les vides nous renseignent sur de nombreux aspects de l'Univers : le processus de formation des grandes structures, des effets de lentille gravitationnelle en champ faible ou certaines anomalies du fond diffus cosmologique, tel le point froid (*voir l'article d'István Szapudi, pages 24 à 31*).

Les vides nous permettent aussi d'étudier l'expansion accélérée de l'Univers. En 1998, en utilisant des supernovæ de type Ia, plusieurs équipes ont montré que l'expansion du cosmos accélère depuis environ 7 milliards d'années. Pour expliquer cette dynamique, il faut supposer que l'Univers contient de l'énergie sombre ou qu'il faut modifier les lois de la relativité générale d'Einstein. La nature de l'énergie sombre reste inconnue, mais, si elle existe, elle représenterait près de 70 % du contenu de l'Univers.

Avec les vides cosmiques, nous commençons depuis peu à tester les modèles d'énergie sombre et de gravité modifiée. L'idée d'utiliser les vides pour répondre à ces questions n'est pas nouvelle, mais cette approche était confrontée à un obstacle expérimental important : la difficulté de sonder de grandes portions du ciel profondément, avec une bonne précision sur les mesures de distance des galaxies. L'avènement des grands sondages cosmologiques tels que le programme *BOSS* ont stimulé l'intérêt des vides pour la cosmologie. En effet, les vides cosmiques, qui remplissent la majeure partie de l'Univers, contiennent très peu de matière, et pourraient être composés principalement d'énergie sombre. Ces régions



CHAQUE POINT DE CETTE CARTE EST UNE GALAXIE. Les plus proches de la Terre sont en jaune tandis que les plus éloignées sont en violet. Il est ainsi possible de reconstruire une carte en trois dimensions à partir des données du relevé SDSS III (dont on ne voit ici que 3 %). Outre certaines petites zones sans données, on devine aussi des vides, des régions moins pourvues en galaxies.

se présentent donc comme un laboratoire idéal pour tester les scénarios d'énergie sombre ou les théories de gravité modifiée, les alternatives à la relativité générale.

PLS

Les vides commencent-ils à révéler leurs secrets ?

S. E. : Petit à petit. Une étude récente menée par Nico Hamaus, de l'université de Munich, et à laquelle j'ai participé, s'est concentrée sur la vitesse des galaxies au sein des vides. Cette démarche présente une difficulté observationnelle, car la vitesse que nous mesurons pour une galaxie donnée a deux composantes difficiles à dissocier. La première est liée à l'expansion de l'Univers, le fameux décalage vers le rouge, qui conduit toutes les galaxies à s'éloigner de la Voie lactée. La seconde provient du fait que les galaxies sont dotées d'une vitesse propre au sein d'un vide. En moyenne, elles devraient se déplacer dans toutes les directions. Cependant, les régions denses en matière, qui bordent les vides, attirent les galaxies du vide. En isolant cette dernière composante de vitesse, Nico Hamaus et son équipe ont estimé avec une bonne précision la densité moyenne de matière dans l'Univers et ils ont évalué le taux de croissance des grandes structures.

Cette approche permet aussi de mettre à l'épreuve la relativité générale d'Einstein dans les vides, ces régions de faible densité. Une déviation des observations par rapport aux calculs théoriques serait un indice qu'il faut modifier les lois de la gravitation. Pour l'instant, la conclusion est que la relativité générale tient bon.

PLS

Vous vous intéressez aussi à un autre aspect des vides cosmiques, leur forme. En quoi consiste cette approche ?

S. E. : Avec ma post-doctorante Alice Pisani (qui a récemment obtenu une bourse « L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science »), nous nous intéressons à l'effet Alcock-Paczynski appliqué aux vides cosmiques. Ceux-ci n'ont pas de raison particulière d'être de forme sphérique. Cependant, si l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle, et que nous regardons un grand nombre de vides, leur forme moyenne doit être sphérique, dans l'espace réel. Or, lorsque nous construisons une carte tridimensionnelle des galaxies, nous ne mesurons pas directement leur position, nous enregistrons le décalage vers le rouge de leur spectre lumineux. Pour effectuer la conversion en distance et revenir dans l'espace réel, nous devons choisir un modèle cosmologique. Et si le modèle choisi n'est pas correct, la forme moyenne des vides ne sera pas sphérique. Nous avons là un moyen de tester un grand nombre de modèles, c'est le test d'Alcock-Paczynski. Cette approche est prometteuse et devrait bientôt donner ses premiers résultats.

PLS

Quelles sont les perspectives dans le domaine des vides cosmiques ?

S. E. : Depuis 2014, le programme *BOSS* est devenu *eBOSS* (*e* pour *extended*). L'idée est de chercher des galaxies à plus grande distance que *BOSS*. C'est très excitant pour nous car, en étudiant des vides plus lointains, nous regardons l'Univers plus jeune et nous pouvons voir si la dynamique de l'énergie sombre a changé au cours du temps. Cela permettra de mettre à l'épreuve les prévisions de certains modèles d'énergie sombre.

Un autre programme très attendu est *Euclid*, un satellite européen prévu pour 2020. L'objectif est d'observer plus de 10 milliards d'objets dont 50 millions de galaxies très précisément. Avec un aussi vaste catalogue, les vides auront encore beaucoup choses à nous révéler. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

DES BEAUX LIVRES DE

Pour fêter cette fin d'année, découvrez la science sous ses plus belles formes !

Qu'ont de commun le dieu Hermès, l'ange Gabriel et l'informaticien Turing ? Tous trois tissent la trame d'un conte moderne : par eux, les flux, les réseaux, les télécommunications sont nés !

À la lumière du mythe, les progrès techniques et scientifiques qui ont révolutionné nos modes de vie acquièrent une charge poétique et bouleversante...

16 x 22,5 cm – 240 pages – 35 €

en partenariat avec les éditeurs

Belin:

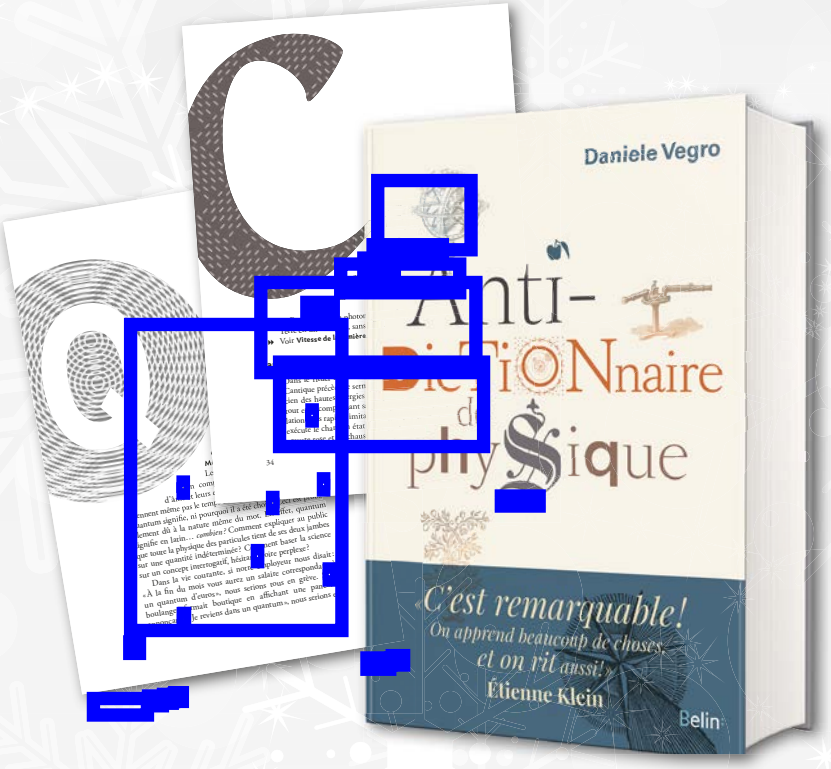
editions-belin.com

Éditions Le Pommier

editions-lepommier.fr

Tous ces livres sont disponibles en librairie.

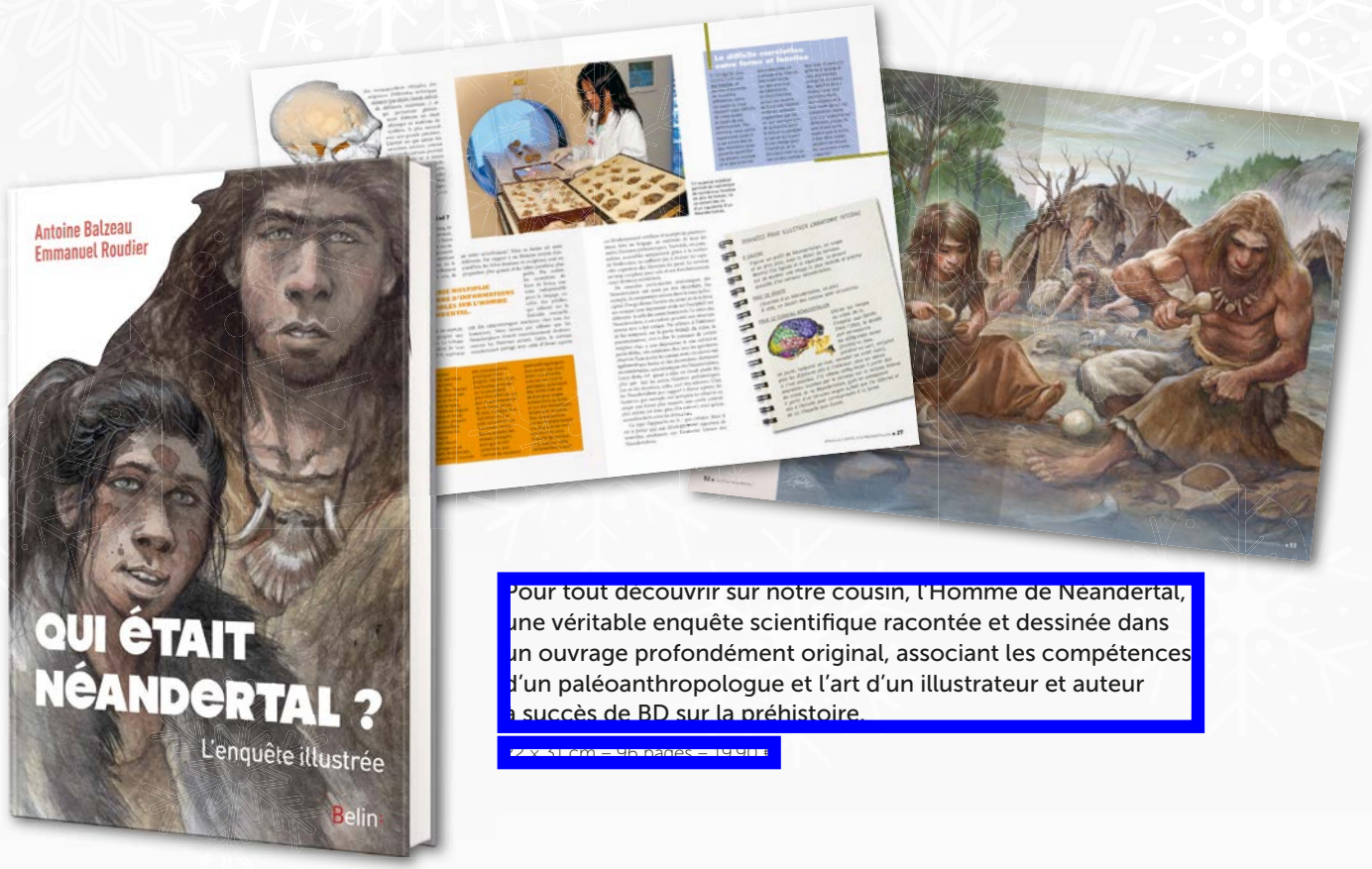
SCIENCES À OFFRIR !



« C'est remarquable ! On apprend beaucoup de choses et on rit aussi. »
Étienne Klein, auteur de la préface

De A comme Âge de l'univers à Z, comme Zéro absolu, un regard décalé, passionné et drôle sur la physique, des particules au cosmos.

12 x 22 cm – 352 pages – 20 €



Pour tout découvrir sur notre cousin, l'Homme de Neandertal, une véritable enquête scientifique racontée et dessinée dans un ouvrage profondément original, associant les compétences d'un paléoanthropologue et l'art d'un illustrateur et auteur à succès de BD sur la préhistoire.

17 x 21 cm – 96 pages – 19 €

Psychologie

LA FRAUDE

un symptôme du

SCIENTIFIQUE

fonctionnement de la science

Le nombre des fraudes scientifiques s'accroît depuis quelques décennies. Les raisons sont multiples et tiennent aussi bien à des individus peu scrupuleux qu'au fonctionnement du système de recherche

Olivier Klein et Vincent Yzerbyt

En septembre 2011, l'université de Tilburg, aux Pays-Bas, a suspendu le professeur Diederik Stapel de ses fonctions pour fraude. Ce chercheur, une célébrité mondiale en psychologie sociale, avait plus d'une centaine de publications à son actif, dont certaines dans les revues les plus prestigieuses. Il s'intéressait surtout à la comparaison sociale, c'est-à-dire à la façon dont nos jugements et comportements sont influencés lorsque nous nous comparons à autrui. Une enquête révélera que près de 55 publications datant de 1996 à 2012 étaient frauduleuses. Diederik Stapel avait soit inventé des données, soit modifié certains résultats de façon à ce qu'ils correspondent à ses hypothèses et soient donc publiables.

Suite à l'émoi suscité par cette affaire, trois chercheurs en psychologie aux Pays-Bas, Wolfgang Stroebe, Russell Spears et Tom Postmes, ont cherché à savoir si l'ampleur de la fraude était un cas unique. Ils ont recensé, entre 1974 et 2012, près de quarante cas comparables dans divers domaines des sciences. Le plus souvent, il s'agit d'un chercheur très brillant et productif qui a inventé ou trafiqué des données sur une longue période. Le record du nombre d'articles frauduleux revient au japonais Yoshitaka Fujii, spécialiste des effets secondaires des anesthésies, qui a maquillé les résultats de plus de 172 articles sur 212 publiés entre 1993 et 2011. Le phénomène touche aussi les sciences « dures », comme le révèle le cas du physicien allemand Jan Hendrik Schön, qui, en 2001, avait annoncé dans la revue *Nature* être parvenu à fabriquer un transistor moléculaire. Cette jeune étoile montante de son domaine avait pourtant construit de toutes pièces les résultats expérimentaux.

En partant de ces exemples, nous proposons quelques pistes pour comprendre le mécanisme de la fraude. Dans notre analyse, nous considérons la recherche scientifique comme un système social et la fraude comme une production de ce

L'ESSENTIEL

- La fraude scientifique peut être analysée comme une conséquence du système de production du savoir scientifique.
- Des intérêts partagés entre le fraudeur et sa communauté facilitent cette tricherie, tels que le besoin de publier dans des revues prestigieuses.
- Certaines fraudes sont liées à des phénomènes psychologiques tels que le biais de confirmation.
- Plusieurs mesures endigueraient la fraude, comme rendre public l'ensemble des documents d'une recherche ou protéger les lanceurs d'alerte.

LE COREEN HWANG WOO-SUK, professeur de médecine vétérinaire et de biotechnologies, est longtemps resté sourd aux critiques concernant ses travaux sur le clonage d'un embryon humain. En 2005, il a reconnu que ses résultats étaient falsifiés.

système. L'apparition de comportements frauduleux est facilitée par certains facteurs, tels que les ambitions personnelles – la carrière, la reconnaissance des pairs, voire l'argent – et par certains aspects du fonctionnement de la recherche. Décrypter les sources de ces dérives permet alors de réfléchir à des moyens pour contrer ce fléau.

Il y a plusieurs obstacles à la détection de la fraude en science. À commencer par les différents intérêts que le fraudeur partage avec le reste de la communauté des chercheurs. La grande majorité de cette communauté est avant tout motivée par la curiosité scientifique et certains résultats – telle la recherche de la matière noire en cosmologie ou de gènes liés à certaines maladies en biologie) créent de fortes attentes, dont les fraudeurs profitent.

Ainsi, Diederik Stapel répondait à de telles attentes en produisant des résultats, inventés ou trafiqués, en accord avec les théories dominantes dans son domaine. Dans un cas, il prétendait avoir montré que le fait de consommer de la viande pouvait mener les individus à se comporter de façon plus « égoïste ». Cette hypothèse, *a priori* farfelue, n'était guère éloignée des travaux sur l'amorçage comportemental, selon lequel un stimulus, même inconscient, déclencherait d'autres comportements cohérents avec ce stimulus. Lorsque les experts chargés d'évaluer ses articles demandaient à Diederik Stapel de vérifier des hypothèses supplémentaires, le chercheur produisait des résultats allant dans le sens des experts, flattant ainsi leur prescience.

Deuxième intérêt partagé par le fraudeur et sa communauté scientifique, la publication des résultats. De façon générale, les articles ont un rôle majeur dans l'évaluation du chercheur, mais aussi dans celle des laboratoires, des universités, voire des pays, engagés dans une compétition de plus en plus féroce. Toutes ces parties prenantes sont jugées en fonction du nombre moyen de citations des articles les représentant. Ce « facteur d'impact », d'autant plus important que la revue est prestigieuse, balise les enjeux d'une compétition pour l'accès à la publication scientifique. Son rôle dans l'évaluation scientifique n'a cessé d'augmenter durant la dernière décennie, une pression que les chercheurs résument à l'expression « *publish or perish* », « publier ou mourir ».

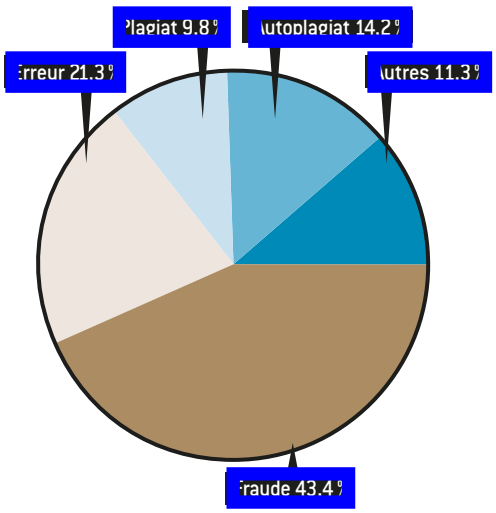
La course à la publication

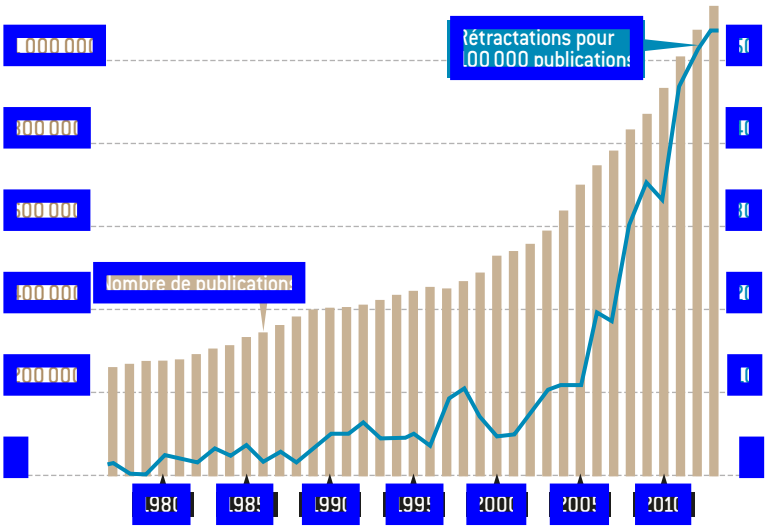
Et plus l'environnement est compétitif, plus la fraude est fréquente. En 2013, Caroline Pulfrey et Fabrizio Butera, à l'université de Lausanne, ont soumis des étudiants en management à une tâche de résolution de problèmes en partie insolubles mais dont la réussite pouvait rapporter une récompense. Ils avaient préalablement évalué l'adhésion des sujets aux valeurs de réussite individuelle et ont constaté un lien significatif entre celle-ci et la fraude à cette tâche (qui consistait ici à déclarer avoir résolu des

LES AUTEURS

Olivier KLEIN est professeur de psychologie sociale à l'université libre de Bruxelles.

Vincent YZERBYT est professeur de psychologie sociale à l'université catholique de Louvain.





LA FRAUDE A SIGNIFICATIVEMENT AUGMENTÉ CES DERNIÈRES ANNÉES dans tous les domaines, à l'image du biomédical dont les chiffres sont donnés ici. La cause principale de retrait d'un article est la fraude, suivie de la détection d'erreurs ou de plagiat.

problèmes insolubles). Cette tendance à la hausse de la fraude est particulièrement claire lorsque l'on examine le taux de retrait d'articles scientifiques : dans le domaine biomédical, on est passé d'environ 25 retraits en 2000 à 300 en 2009. Le motif de retrait le plus fréquent est la fraude, suivi par les erreurs et le plagiat *(voir les figures page 38)*.

Les cibles de choix pour publier sont bien sûr les revues les plus prestigieuses. Or le taux de rejet des articles proposés approche 95 %. Seuls paraissent les articles qui rencontrent les critères particuliers de la revue, à savoir : la nouveauté, l'innovation théorique et la solidité des données. De toute évidence, des résultats surprenants – qui interrogent des conceptions dominantes – ou séduisants – « sexy » comme le disent certains – et des données statistiquement significatives confortant l'hypothèse formulée par le chercheur sont davantage susceptibles de passer la rampe.

D'où la tentation pour le fraudeur d'annoncer un résultat fracassant ou de truquer ses données. Ainsi, le Coréen Hwang Woo-suk, qui avait affirmé avoir cloné des embryons humains, et la Japonaise Haruko Obokata, qui avait, selon ses dires, développé une méthode simple pour créer des cellules pluripotentes, ont publié dans deux revues de premier rang *(voir l'encadré page 42)* avant que les fraudes ne soient détectées.

Les deux exemples précédents concernent pourtant des articles signés par plusieurs auteurs, mais ici la fraude est souvent facilitée par le fait qu'une seule personne dans la collaboration a accès à l'ensemble du matériel expérimental et des données. Il lui est donc aisé lors de l'analyse des résultats de les manipuler à l'insu de ses coauteurs dont le rôle dans un tel projet concerne surtout l'élaboration initiale de la recherche et les révisions de l'article final.

Autre motivation à la fraude : l'argent. Dans certaines disciplines, il est quasiment devenu le « nerf de la guerre ». Cela explique sans doute en partie pourquoi un grand nombre de fraudes se déroulent en sciences de la vie, vu les enjeux financiers dans ce domaine. Mais même dans des domaines moins liés à l'industrie, les chercheurs peuvent bénéficier financièrement de publications malhonnêtes dès lors que celles-ci jouent un rôle dans l'avancement de leur carrière scientifique, pour l'obtention de subventions, etc. Le fonctionnement de la recherche actuelle fait que le chercheur doit souvent aller lui-même chercher ses subventions en rédigeant des dossiers, dans lesquels ses travaux antérieurs et ses articles occupent une place de choix dans la décision. Ici non plus, il ne faut pas négliger l'intérêt financier de l'institution. Ainsi, le financement de plus de 200 millions de dollars accordés à l'université Duke, aux États-Unis, dans le cadre des travaux de la biologiste Erin Potts-Kant, ont pu inciter l'institution à fermer les yeux sur les allégations de fraude faites à son encontre avant qu'une enquête soit diligentée en 2016.

La confiance domine chez les chercheurs

Outre ces différents intérêts convergents, certaines normes sociales partagées dans la communauté scientifique favorisent la non-détection de la fraude. En effet, l'idée que les données d'un collègue puissent être frauduleuses ne fait guère partie de « l'horizon mental » du chercheur. Cette norme de confiance diminue la vigilance des témoins éventuels. Dans le cas de Diederik Stapel, elle avait quelque chose d'aveuglant : ses collaborateurs ne voyaient pas de grossières « erreurs » statistiques, telles des séries de chiffres ayant tous les mêmes décimales.

La fraude prend aussi d'autres formes, encore plus subtiles, liées à deux phénomènes psychologiques bien connus, le biais de confirmation et le raisonnement motivé. Ils sont susceptibles de favoriser des pratiques déontologiquement discutables en l'absence de toute volonté délibérée de frauder. Ainsi, un article est le résultat d'une série de prises de position et de décisions, la grande majorité étant possiblement inconsciente *(voir l'encadré ci-contre)*.

Le biais de confirmation nous pousse à interpréter la réalité dans le sens qui nous arrange ou en fonction de nos attentes. Appliqué à la recherche, ce biais fait que les chercheurs sont susceptibles de ne voir dans leurs données que ce qui se conforme à leurs hypothèses, voire à se montrer beaucoup plus prudents quant à l'interprétation de données « inattendues » qu'à celles de données « attendues ».

En 2012, Joseph Simmons et ses collègues de l'université de Pennsylvanie ont ainsi réussi à montrer que des étudiants rajeunissaient s'ils écoutaient *When I'm Sixty-Four*, des Beatles. Pour obtenir ce résultat, les chercheurs faisaient écouter cette chanson à des élèves et une autre chanson sans notion d'âge à un groupe différent. La

Lorsque nos préjugés nous aveuglent

Le biais de confirmation intervient aussi bien dans les choix méthodologiques des chercheurs que dans la vie courante.

Dans une étude menée en 1979 par Charles Lord, Lee Ross et Mark Lepper, de l'université Stanford, des Américains, pour moitié défenseurs de la peine de mort et pour l'autre opposants, lisaient deux études fictives et contradictoires comparant les taux d'homicides dans des États américains avant et après l'introduction de la peine capitale. Les sujets se montraient beaucoup plus critiques à l'égard de la méthodologie de l'étude qui allait à l'encontre de leur opinion.

Leurs attitudes influençaient leur appréhension du texte dans un sens qui, eussent-ils été chargés d'expertiser des articles scientifiques, auraient favorisé la publication d'articles cohérents avec leur point de vue.

comparaison directe des résultats des deux groupes n'indiquait pas de rajeunissement dans l'un plus que dans l'autre. Cependant, en sélectionnant certains critères sur les données récoltées, les auteurs de l'étude pouvaient créer et amplifier un effet de l'exposition à la chanson. Par exemple, si prendre en compte le sexe des sujets augmentait l'effet de jouvence, on l'intégrait, sinon on l'ignorait. Ensuite, si la différence d'âge n'était toujours pas significative, on ajoutait dix sujets à chaque condition. En combinant différents choix de ce type, on pouvait parvenir à un résultat « significatif », bien que totalement absurde.

Une autre source d'« erreur » réside dans le fait de récolter de nombreuses mesures et de ne rapporter que celles qui livrent des résultats significatifs. Et ça marche, la preuve : un chercheur allemand, Johannes Bohannon, a publié qu'un régime riche en chocolat fait perdre du poids, ce qui lui a valu une large couverture médiatique. Mais son objectif était de mettre en évidence les failles du système de publication scientifique.

En outre, lorsque nous sommes confrontés à une situation qui rencontre nos intérêts, et qu'une justification est disponible pour tirer le meilleur parti de cette situation, nous sommes susceptibles de considérer cette justification comme légitime, même si notre conduite peut sembler immorale à un acteur extérieur. Un chercheur pourrait ainsi justifier certaines options méthodologiques ou statistiques « qui l'arrangent » en considérant, par exemple, que tout le monde agit de la même façon.

Dans ces situations, l'image qu'il renvoie est importante pour le fraudeur. À l'appui de cette observation, des chercheurs en psychologie, Christopher Bryan, Gabrielle Adams et Benoît Monin, ont soumis des étudiants à un jeu de hasard dans lequel ces derniers devaient tirer une pièce de monnaie. Chaque fois qu'ils obtenaient « face », ils recevaient un dollar mais ils devaient annoncer eux-mêmes le résultat, ce qui créait une structure d'intérêt favorable à la fraude (déclarer « face » alors qu'on a tiré « pile »). Préalablement à l'expérience, on avertissait la moitié des sujets de ne pas tricher. À l'autre moitié, on disait de ne pas être des tricheurs : on changeait donc « tricher » en « tricheur ». Dans ce second cas, la fraude apparaît comme une caractéristique de personnalité, ce qui va bien au-delà d'un simple comportement. Les chercheurs ont observé que les participants s'abstiennent davantage de tricher lorsque ce trait est attribué à leur personne (condition « tricheur »), suggérant que les tricheurs potentiels souhaitent conserver une image d'individus honnêtes.

La fraude prend de nombreuses formes et est souvent difficile à percevoir. On peut penser que la relecture par un expert chargé d'évaluer un article lors de sa soumission à une revue (*peer review* en anglais ou évaluation par les pairs) serait un garde-fou efficace. Mais guidé par la norme de confiance évoquée précédemment, l'expert n'envisage généralement pas la détection de la manipulation douteuse comme une de ses attributions, et il est peu susceptible de la soupçonner. Mais si un résultat est frauduleux, de multiples tentatives de réplication infructueuses ne devraient-elles permettre de le détecter et, dès lors, de minimiser son pouvoir de nuisance ? Malheureusement, les chercheurs ont peu de motivation à répliquer les travaux de leurs collègues. Il faut d'abord avoir les moyens de le faire. Ensuite, en cas de résultat concordant, cela ne donnera pas lieu à une publication. En cas de désaccord, les revues scientifiques restent réticentes à publier ces réplications infructueuses, car il est bien trop difficile de déterminer s'il s'agit d'une défaillance dans la procédure de réplication, de la correction d'une conclusion antérieure ou, pire, de la mise en évidence d'une possible fraude.

Les cas de fraude relayés dans les médias donnent une image négative de la recherche auprès du grand public. Il est donc crucial d'agir pour limiter ces comportements. Peut-on esquisser quelques enseignements pratiques des cas cités précédemment ? Il n'y a évidemment pas de panacée pour lutter contre la tricherie et la fraude. Certaines pistes se dessinent, au-delà d'une solide formation des chercheurs en méthodologie, en statistiques, en déontologie et en éthique, et d'un environnement académique et scientifique où la volonté de cultiver une honnêteté intellectuelle est mise au premier plan. Souvent un fraudeur commence par des faits minimes, sans gravité. Il est ensuite pris dans une spirale et la fraude prend de

'ampleur. Débusquer assez tôt les petites fraudes serait efficace.

Une première piste, dans le cas de travaux qui impliquent plusieurs chercheurs, consiste à rendre l'ensemble des documents, fichiers de données accessibles à tous les coauteurs d'un article, en les désignant collectivement responsables de ceux-ci, y compris dans leur conservation. Demander qu'au moins deux coauteurs corroborent les analyses, et en soient garants permettrait de mieux détecter des erreurs et de minimiser, du moins en partie, le risque de tricherie.

Des données accessibles à tous

Cette ouverture pourrait être étendue à l'ensemble de la communauté scientifique. En rendant toutes les étapes du processus de recherche davantage accessibles et en donnant un accès large à tous les documents et données (éventuellement après une période d'embargo), on pourrait limiter certaines fraudes. Ainsi, si un scientifique émet des doutes sur les conclusions d'un collègue, il pourra consulter les documents antérieurs du processus de recherche afin de tester d'autres hypothèses. Avec un tel dispositif, si Johannes Bohannon, l'auteur de la fausse étude sur « chocolat et régime », avait divulgué l'ensemble de son protocole, un observateur attentif aurait constaté qu'il n'avait divulgué qu'un nombre très limité de résultats.

Une initiative facilitant ce type de démarche est l'*Open Science Framework*. Cette plateforme permet aux chercheurs de mettre en ligne toutes les étapes de leur processus de recherche et de proposer des réplications d'études antérieures. Institutionnaliser ces pratiques, par exemple en les rendant obligatoires pour obtenir des subsides ou pour publier des recherches, pourrait être efficace. Certaines revues (par exemple, les revues de la *Public Library of Science*, PLoS) et quelques institutions (telle la Commission européenne) le préconisent déjà.

Une autre solution consisterait à épauler les « lanceurs d'alerte », car dans la plupart des cas, la fraude est détectée par des collaborateurs proches, tels des doctorants, particulièrement vulnérables. Il faudrait rendre transparentes les procédures de dénonciation des tricheries au sein d'une institution en en garantissant l'anonymat des plaignants. Le recours à un médiateur semble bienvenu à cet égard. Autre possibilité, un site internet, tel Pubpeer, permet à des utilisateurs de commenter des articles publiés, voire de dénoncer des fraudeurs. Cela a été le cas du biochimiste Fazlul Sarkar. Certains commentateurs avaient mis en cause l'intégrité de ses travaux. Le chercheur avait alors porté plainte pour diffamation contre le site faute de pouvoir connaître l'identité des accusateurs. Cependant, un comité d'experts a depuis reconnu le biochimiste coupable de fraude.

Assurer la publicité des fraudes détectées soulignerait aussi le bon fonctionnement du processus. Mais la question de l'anonymat est délicate surtout lorsqu'une enquête est diligentée. Plus grave, il faut rester attentif aux dérives éventuelles de ce qui pourrait devenir une culture de la délation. Les accusations de fraude entachent la réputation et la carrière de ceux qu'elles visent et peuvent elles-mêmes être motivées par des considérations peu reluisantes.

POUR EN SAVOIR PLUS

N. Chevassus-Au-Louis, **Malscience, de la fraude dans les labos**, Seuil, 2016

Enquête sur la fraude scientifique, *Le Journal du CNRS*, n° 278, automne 2014

La plateforme **Open Science Framework**, https://osf.io

Des erreurs de méthodologie

En 2010, la prestigieuse revue *Psychological Science* a publié une étude qui montre comment la posture d'un individu influe sur sa production

En 2016, la première auteure de cette étude, Dana Carney, de l'université de Californie à Berkeley, a publiquement renié son propre travail. En effet, en 2014, une équipe indépendante avait été incapable de reproduire cet effet et une métaanalyse avait montré que l'effet n'était pas statistiquement significatif.

Dana Carney a indiqué que certains choix méthodologiques avaient sans doute favorisé l'obtention d'un résultat artificiellement significatif.

L'expérience consistait à demander à des étudiants d'adopter deux postures expansives (bras écartés), typiques d'une personne ayant un niveau de pouvoir élevé. D'autres devaient adopter deux postures beaucoup plus contractées, typiques de personnes ayant un niveau de pouvoir faible. Après chaque pose, les sujets jouaient à un jeu de hasard. Leurs taux de testostérone et de cortisol, des hormones associées respectivement à l'agressivité et à la régulation du stress, étaient mesurés.

L'article indiquait que la concentration de cortisol diminuait alors que le taux de testostérone augmentait suite à l'adoption d'une posture de « pouvoir élevé » et ces sujets faisaient alors des choix plus risqués au jeu de hasard.

L'honnêteté somme toute hardive de Dana Carney a été diversement saluée par la communauté, mais n'a pas été du tout du goût d'une de ses coauteurs dans l'étude de 2010, Amy Cuddy, professeure à Harvard. Suite à la conclusion de leur étude, cette dernière avait lancé un vaste programme pour souligner l'importance de la posture pour le bien-être. Elle a aussi réalisé des conférences grand public et écrit un best-seller.

En réponse à l'annonce de Dana Carney, Amy Cuddy, dont la crédibilité était entachée, a attribué à Dana Carney l'entière responsabilité des choix méthodologiques douteux, dont elle affirme n'avoir pas eu connaissance.

Si les pratiques reconnues par Dana Carney sont sans commune mesure avec la fraude manifeste comme l'invention de données, elles sont bien plus répandues et, souvent, le chercheur n'est pas même conscient qu'elles nuisent à la validité de ses conclusions. Cet exemple montre comment des choix partiaux peuvent « polluer » la littérature scientifique.

DES ANNONCES FRACASSANTES POUR DE FAUSSES DECOUVERTES

Premier clonage d'embryon humain et technique simple et innovante pour obtenir des cellules pluripotentes. Ces deux découvertes ont fait la une dans tous [illegible] leurs résultats.

Hwang Woo-suk était considéré comme une référence dans le domaine de la recherche des cellules souches. En 2004, il a annoncé, dans la revue *Science*, avoir cloné un embryon humain, une première mondiale. L'année suivante, il a été accusé d'enfreindre certaines règles éthiques, il utilisait les ovocytes de femmes qu'il payait sans leur expliquer la finalité de ses travaux. Une polémique s'est ensuivie et ses résultats ont été mis en doute. Une commission d'enquête de l'université de Séoul a alors conclu qu'il y a bien eu fraude (images trafiquées). Hwang Woo-suk a reconnu les faits et a démissionné de son poste. L'article de *Science* a été retiré. En 2007, une étude indépendante ayant eu accès à ces lignées de cellules, a conclu que Hwang Woo-suk avait pourtant réalisé une première scientifique en obtenant des cellules souches embryonnaires humaines, non par clonage mais par parthénogenèse (par division du gamète femelle non fécondé).

Le cas de Haruko Obokata, de l'institut Riken, au Japon, est assez similaire. En 2014, la jeune femme a décrit dans deux articles une technique pour transformer des cellules de souris adulte en cellules pluripotentes grâce à un choc acide. La méthode, plus simple, a d'abord été accueillie avec enthousiasme. Mais très vite, des chercheurs ont pointé des incohérences méthodologiques, des images modifiées, etc. Par ailleurs, plusieurs équipes avaient échoué à reproduire les résultats publiés. L'institut Riken a alors diligenté une enquête et en avril 2014, la commission a conclu qu'Haruko Obokata était coupable de fraude dans deux des six accusations portées contre elle. Les articles, publiés dans *Nature*, ont été retirés quelques mois plus tard. Qu'en est-il des coauteurs ? Dans cette affaire, il est clair que ceux-ci n'avaient pas suivi en détail les expériences menées en laboratoire. Teruhiko Wakayama s'est rapidement prononcé pour un retrait des articles affirmant qu'il avait perdu confiance en ces résultats. Plus dramatique, Yoshiki Sasai, mentor d'Obokata et coauteur, pourtant disculpé de toute fraude, s'est suicidé le 5 août 2014, suite à l'accusation d'avoir failli dans sa supervision de la jeune chercheuse.

DANS L'EXPÉRIENCE DE HARUKO OBOKATA, les nouvelles cellules souches obtenues par choc acide *(en vert)* sont injectées dans un embryon de souris et participent au développement de tous ses tissus

Ainsi, outre les universités et les institutions scientifiques, il pourrait être bienvenu que, dans chaque discipline, l'association scientifique de référence mette en place ses propres procédures pour instruire les accusations de fraude.

Avec l'avènement de la publication électronique, la contrainte du nombre limité de pages s'est fortement assouplie. Dès lors, les auteurs devraient pouvoir mieux détailler leurs expériences et les articles être jugés aussi bien sur la pertinence méthodologique que sur les résultats.

La fraude est par de nombreux aspects un produit du fonctionnement de la recherche. L'évaluation focalise sur le nombre d'articles et pousse ainsi les chercheurs à morceler leurs articles au lieu de proposer des publications montrant des séries cohérentes de travaux où la fraude serait alors moins facile à mettre en place. Il s'agit donc en quelque sorte de privilégier, chez un chercheur, la qualité des publications plutôt que leur nombre. Beaucoup de chercheurs en appellent à ce changement de mentalité, mais cela passe par une réforme profonde du système de recherche. Est-elle possible ? Dans tous les cas, il est probablement illusoire de croire que le phénomène de fraude peut être totalement jugulé. Il peut cependant être limité.

Parmi les propositions évoquées pour améliorer le système de recherche, il importe d'envisager le bénéfice et le coût de chacune. Peut-être certaines mesures antifraude (par exemple, cesser d'offrir des incitations à publier dans des revues prestigieuses) auront-elles un effet négatif sur la qualité de la production du système dans son ensemble. De même, un contrôle excessif mènerait à une suspicion généralisée défavorable à l'innovation scientifique. La confiance entre les chercheurs doit rester une norme fondamentale. Il pourrait donc être avisé d'adopter une approche s'inspirant des politiques de santé publique : minimiser les risques mais en sachant qu'un mode de vie normal est impossible si on cherche à les éradiquer complètement. ■

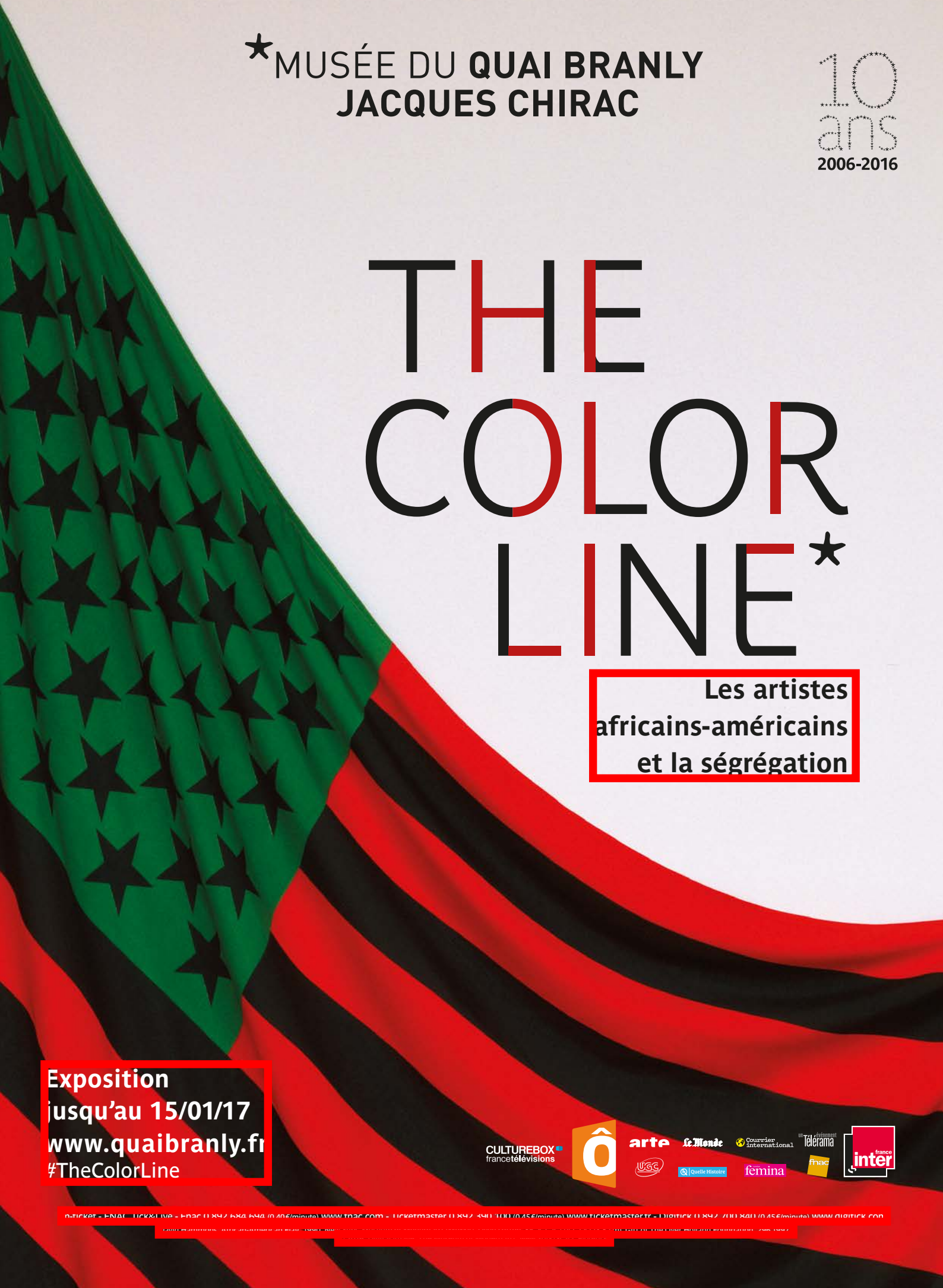
BIBLIOGRAPHIE

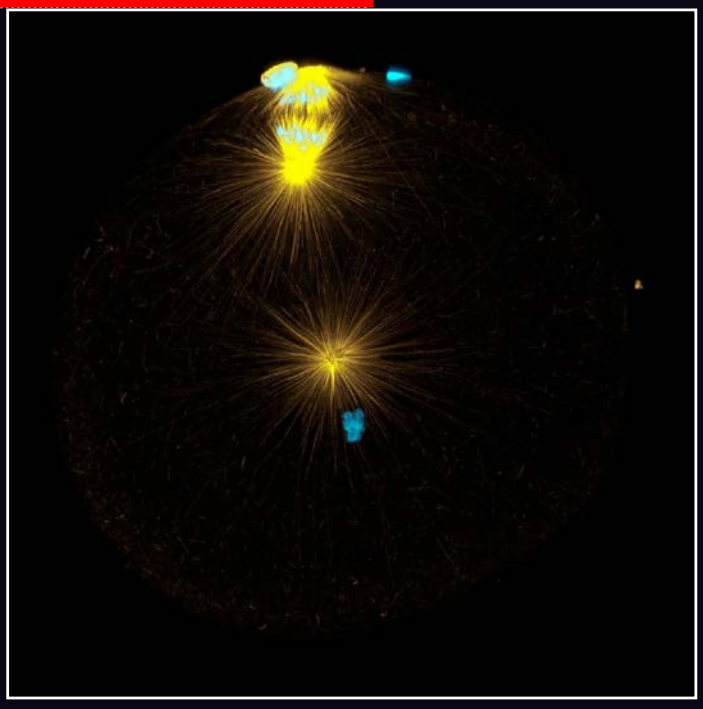
N. Mazar et D. Ariely, **Dishonesty in scientific research**, *J. Clin. Invest.*, vol. 125, pp. 3993-3996, 2015.

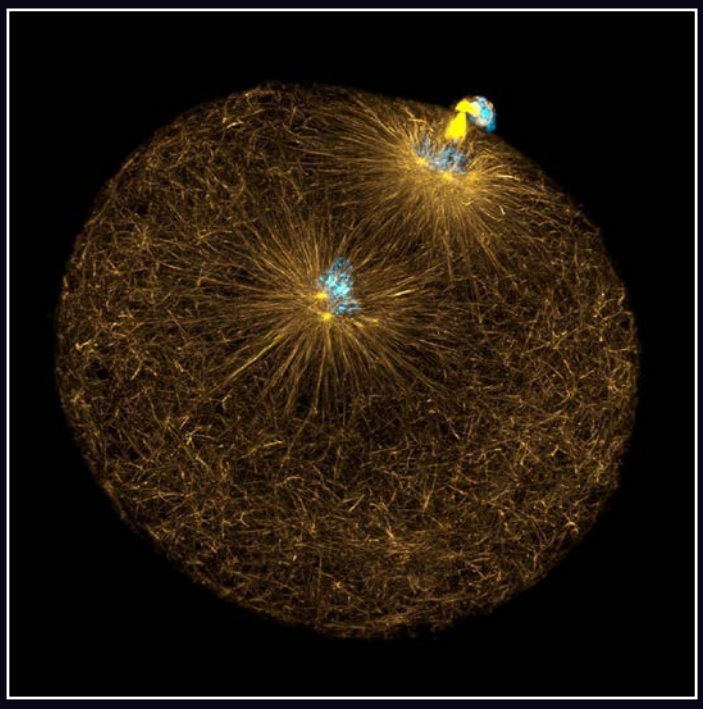
L. Pulfrey et F. Butera, **Why neoliberal values of self-enhancement lead to cheating in higher education a motivational account**, *Psychol. Sci.*, vol. 24, pp. 2153-2162, 2013.

W. Stroebe *et al.*, **Scientific misconduct and the myth of self-correction in science**, *Persp. Psychol. Sci.*, vol. 7, pp. 670-688, 2012.

F. C. Fang *et al.*, **Misconduct accounts for the majority of retracted scientific publications**, *PNAS*, vol. 109, pp. 17028-17033, 2012.


MUSÉE DU QUAI BRANLY
JACQUES CHIRAC
10 ans
2006-2016
THE COLOR LINE*
Les artistes africains-américains et la ségrégation
Exposition
jusqu'au 15/01/17
www.quaibranly.fr
#TheColorLine
CULTUREBOX
francetélévisions
arte
Le Monde
Courrier International
Télérama
fnac
inter
UGC
Quelle Histoire
femina





Mécanique de la cellule et œuf mollet

Samedi 17 novembre 2012 : Ai acheté le composé à tester pour voir si durcir les cellules les fait se diviser de manière symétrique.

18 novembre : Les cellules qui doivent normalement flotter collent au fond de leur boîte. Trouver un autre milieu de culture pour dissoudre ce composé afin qu'elles ne collent pas.

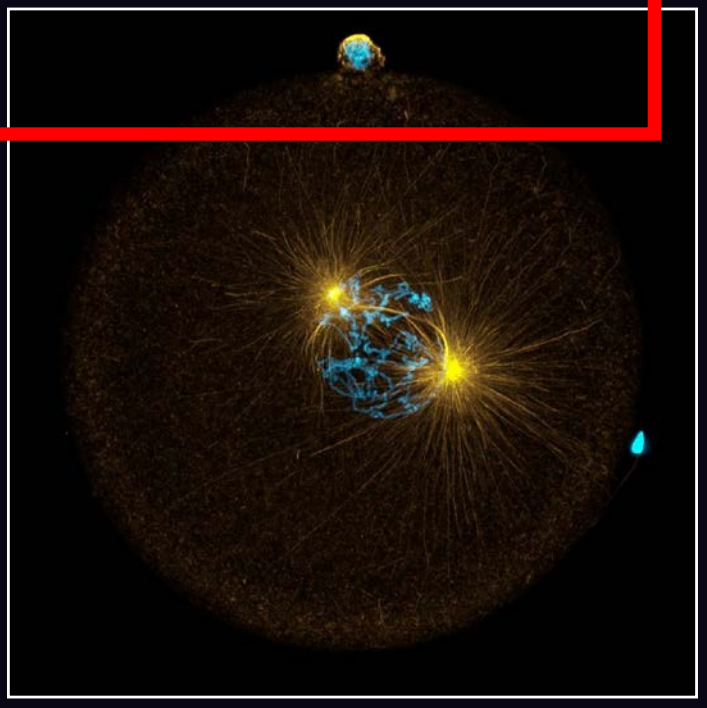
21 novembre : Ai essayé un nouveau milieu. Le composé à tester ne se dissout pas dedans.

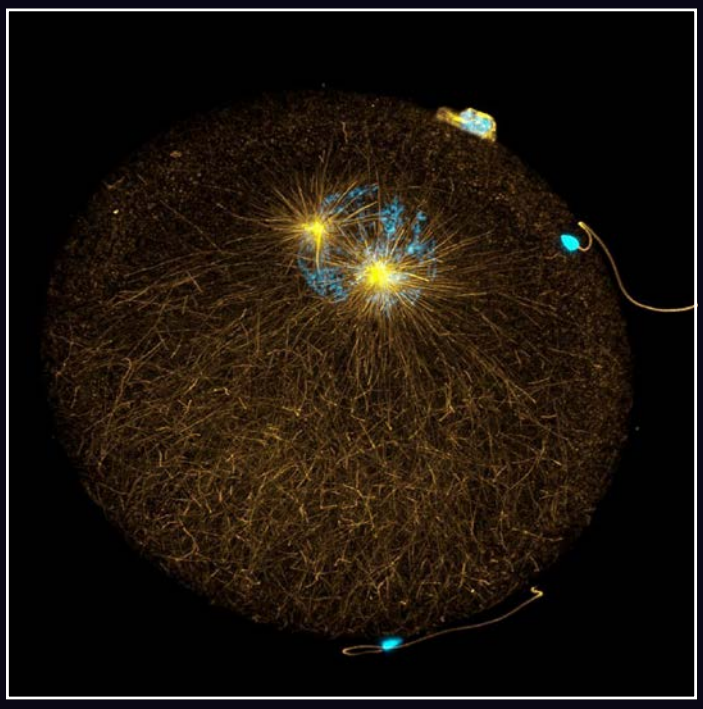
22 novembre : Collées ou pas collées, elles meurent. Changer le milieu

28 novembre : Ai trouvé une idée en discutant avec mes collègues. Si je mets un tapis d'agarose au fond de la boîte, ça collera moins. Ai essayé avec 0,067 % d'agarose. Les cellules meurent. Par contre, elles ne collent plus.

5 décembre : Repris le vieux milieu dans lequel le composé se dissout bien. Les cellules meurent dedans. Trop vieux ?

7 décembre : Ai refait du milieu





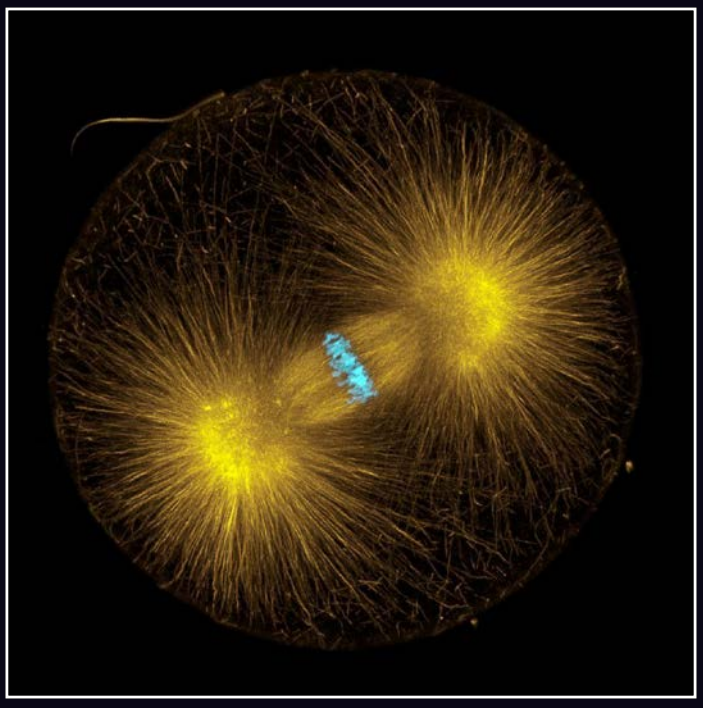
LA FECONDATION déclenche a fin de la méiose – la préparation de l'ovocyte. Une division asymétrique se produit alors *(en jaune intense sur l'image de gauche)*, éjectant la moitié de l'ADN *(en bleu)* dans une minuscule cellule qui dégénérera *(en haut sur l'image au centre)*. L'ADN de l'ovocyte et du spermatozoïde se combinent, et la première division – symétrique – de l'embryon a lieu *(ci-dessous)*. Ici, l'ovocyte provient du ver marin *Cerebratulus marginatus*, mais le processus est similaire chez les mammifères.

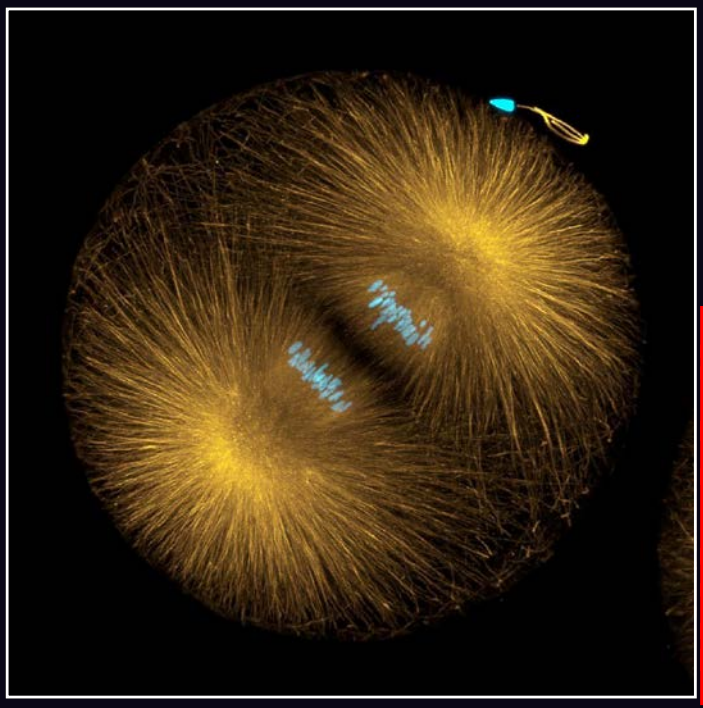
L'ESSENTIEL

- Contrairement à la plupart des cellules, certaines se divisent de façon asymétrique.
- C'est le cas de l'ovocyte, la cellule sexuelle femelle, qui forme une grosse cellule, contenant toutes les réserves nutritives, et une petite vouée à disparaître.
- Pour que cette division soit possible, l'ovocyte ne doit être ni trop dur ni trop mou. Une cascade de protéines contrôle la tension du squelette de la cellule.
- Ce mécanisme est peut-être universel, partagé avec les bactéries et les plantes.

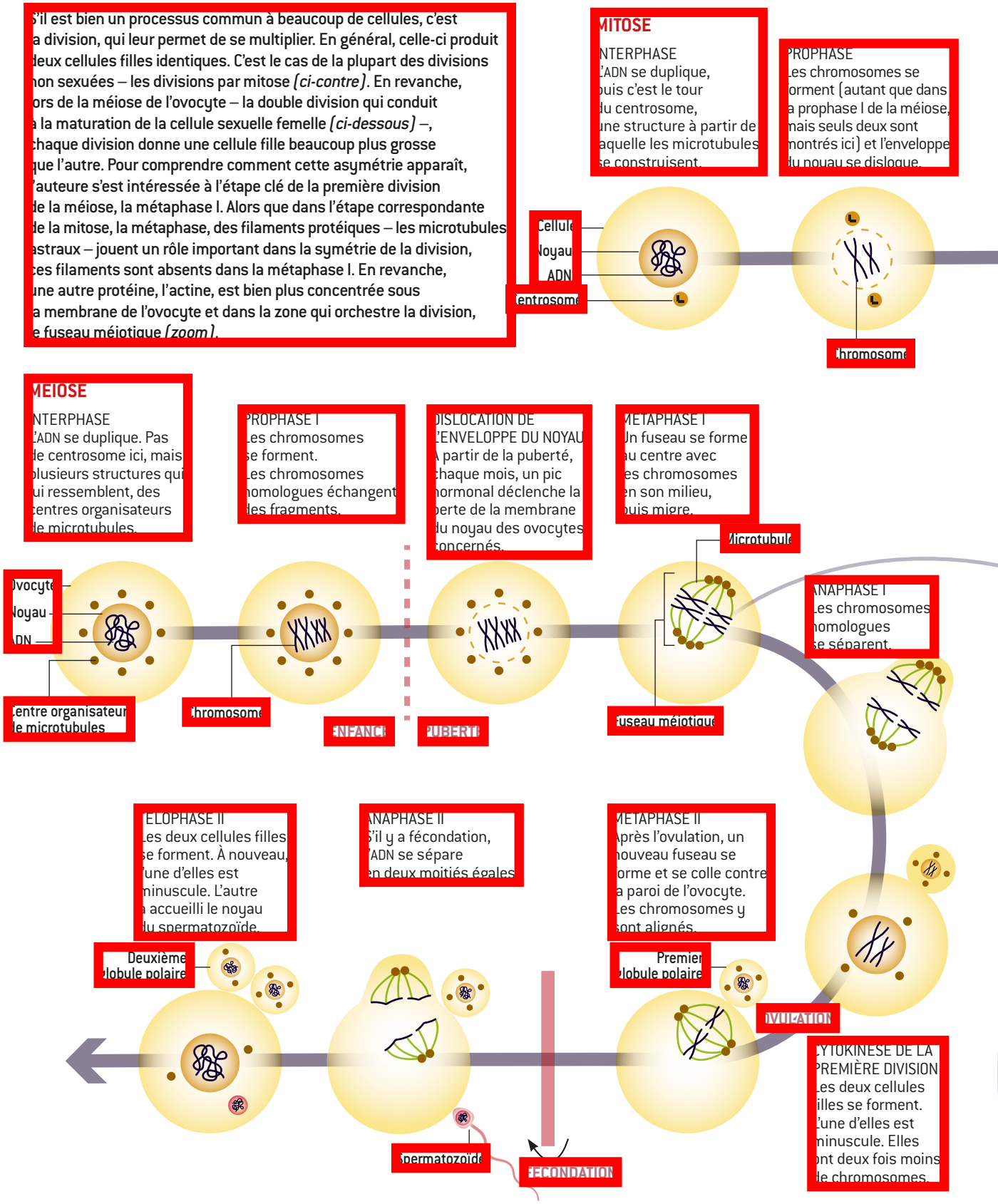
Agathe Chaigne

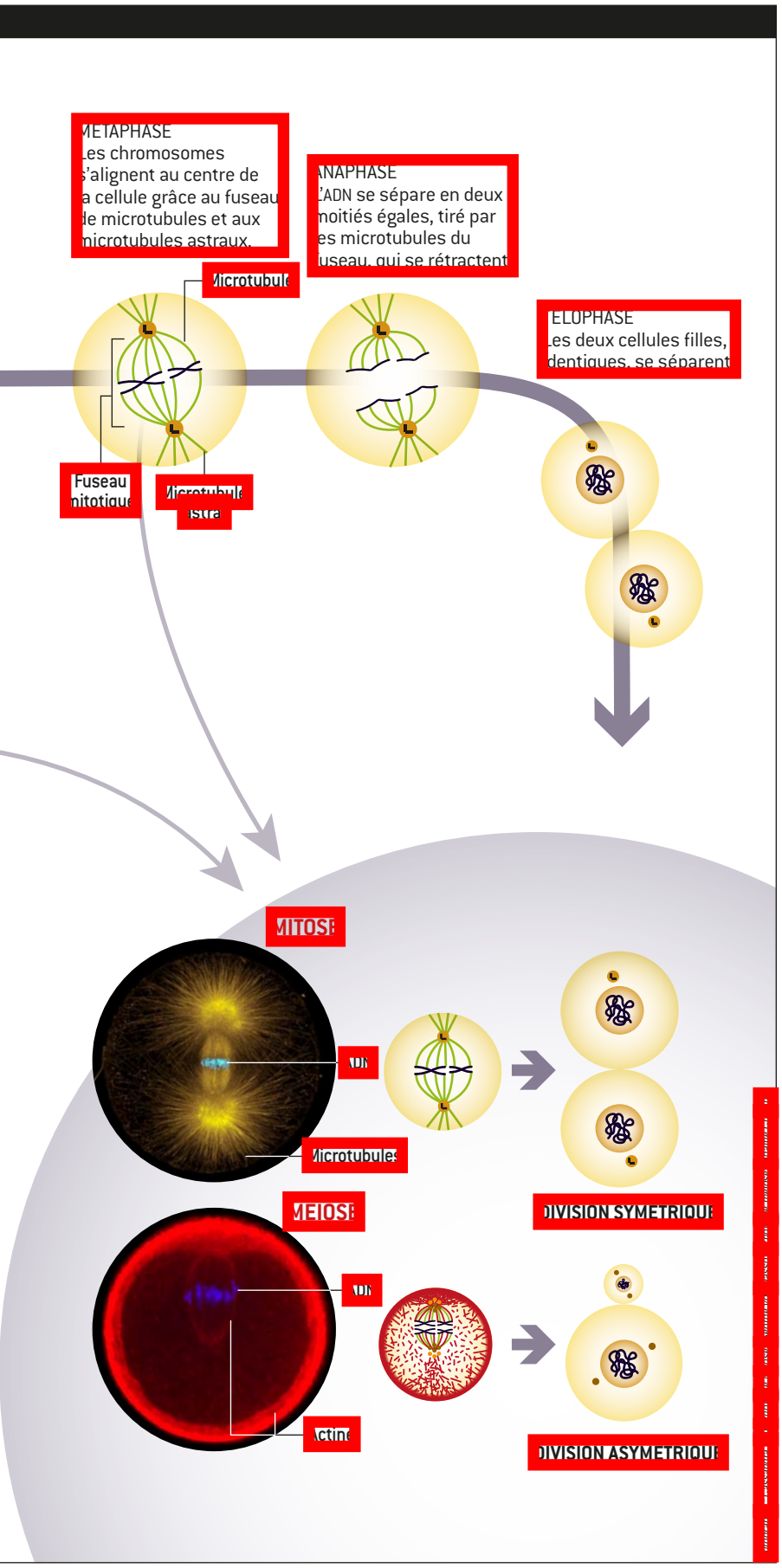
Ni trop dur ni trop mou : tel est le secret de l'ovocyte, la cellule sexuelle femelle. Alors seulement, il se divisera de façon asymétrique, optimisant ainsi les chances de survie de l'embryon qu'il deviendra peut-être.





S'il est bien un processus commun à beaucoup de cellules, c'est la division, qui leur permet de se multiplier. En général, celle-ci produit deux cellules filles identiques. C'est le cas de la plupart des divisions non sexuées – les divisions par mitose *(ci-contre)*. En revanche, lors de la méiose de l'ovocyte – la double division qui conduit à la maturation de la cellule sexuelle femelle *(ci-dessous)* –, chaque division donne une cellule fille beaucoup plus grosse que l'autre. Pour comprendre comment cette asymétrie apparaît, l'auteure s'est intéressée à l'étape clé de la première division de la méiose, la métaphase I. Alors que dans l'étape correspondante de la mitose, la métaphase, des filaments protéiques – les microtubules astraux – jouent un rôle important dans la symétrie de la division, ces filaments sont absents dans la métaphase I. En revanche, une autre protéine, l'actine, est bien plus concentrée sous la membrane de l'ovocyte et dans la zone qui orchestre la division, le fuseau méiotique *(zoom)*.





8 décembre : Le milieu a l'air bien, en revanche l'agarose semble tuer les cellules.

15 décembre : Ai fini par comprendre que c'est l'huile qu'on met au-dessus du milieu qui est trop vieille ! Ai racheté de l'huile.

20 décembre : Du coup, le milieu est trop vieux. L'ai refait.

22 décembre : Ai fait un test avec le composé ; ça a l'air de marcher, les cellules se divisent plus symétriquement que d'habitude ! À confirmer en les filmant au microscope.

3-5 janvier : Les cellules meurent dans l'agarose. Ai essayé de mettre l'agarose sur une boîte en plastique plutôt qu'en verre. Les cellules meurent encore.

6 janvier : Ai essayé de traiter les cellules pour empêcher qu'elles collent. Ça marche, mais le composé ne les pénètre plus.

7-27 janvier : Ai essayé 25 000 conditions. Ai changé de boîte. Ai changé les concentrations d'agarose. Les cellules meurent.

30 janvier : Ai fini par trouver des bonnes conditions pour le milieu, pour l'agarose, pour le composé. À refaire au microscope, en marquant les chromosomes.

1-3 février : Ai testé toutes les conditions de microscopie sans le composé. Les cellules se divisent normalement et asymétriquement, on voit bien les chromosomes !

Février : Plus rien ne marche. Je refais tous les milieux.

Mars : Ça remarche, mais il faut mettre le marqueur des chromosomes tard. Sinon, les cellules meurent.

Avril : ÇA MARCHE

La quête de l'œuf asymétrique

Faire une thèse ressemble souvent à un roman initiatique chinois (ou à un jeu vidéo) : après avoir eu l'impression de vaincre le grand méchant de fin de niveau, je me retrouvais systématiquement avec plus de murs devant moi.

D'un point de vue théorique, la quête infinie du : « Et pourquoi ? » constitue la plus grande motivation – et le plus grand désespoir – du chercheur en biologie. C'est elle qui lui donne l'envie de se lever le matin et de refaire encore et encore la même expérience. D'un point de vue plus prosaïque, cela a consisté pour moi, par exemple, à changer la concentration de l'agarose, qui sert juste à empêcher les cellules de coller à leur substrat, microlitre par microlitre,

pendant six mois, afin de pouvoir enfin ester si le composé qui durcit les cellules joue un rôle dans la géométrie de la division cellulaire.

Ma quête a débuté en 2011, au Collège de France, à Paris, sous la direction de Marie-Émilie Terret, dans le laboratoire de Marie-Hélène Verlhac. Elle a consisté à comprendre comment certaines cellules se divisent de façon asymétrique. Plus précisément comment l'ovocyte, ou œuf, c'est-à-dire la cellule sexuelle femelle, se divise de façon asymétrique.

Quand je commence le stage de master qui aboutit à cette thèse, j'ai vingt-cinq ans, je viens d'avoir mon diplôme de journaliste et l'agrégation de sciences de la vie et de la Terre, et je ne suis pas convaincue de vouloir faire de la recherche. Néanmoins,

j'ai toujours bien aimé la division cellulaire. C'est un processus incroyable : une cellule donne deux cellules. Une cellule normale, une cellule de peau par exemple, réplique son ADN, puis se divise en deux en mettant une copie de l'ADN d'un côté, la seconde copie de l'autre, et voilà que l'on se retrouve avec deux cellules identiques au lieu d'une. C'est un événement majeur dans la vie d'une cellule : des centaines de protéines travaillent ensemble pour que la division se passe bien, pour que l'ADN soit bien répliqué et bien réparti de part et d'autre de la cellule.

La plupart des cellules se divisent de façon symétrique : les deux cellules produites, ou cellules filles, sont identiques. Mais certaines se divisent de façon asymétrique : les deux cellules filles n'ont pas la même taille, ou pas le même contenu, ou ni l'un ni l'autre, ce qui peut être crucial dans leur devenir. Par exemple, chez la mouche, certaines cellules se divisent de façon asymétrique et seules les plus petites cellules filles forment les neurones.

On connaît les grandes lignes de la façon dont une cellule classique contrôle la symétrie ou l'asymétrie en taille de sa division. Une structure – le fuseau – formée de filaments protéiques appelés microtubules, est responsable du positionnement des chromosomes dans la cellule, qui se divise toujours exactement à leur emplacement *(voir l'encadré pages 46 et 47)*. Si le fuseau n'est pas au centre de la cellule, celle-ci ne se divisera pas en son milieu et la division sera donc asymétrique en taille.

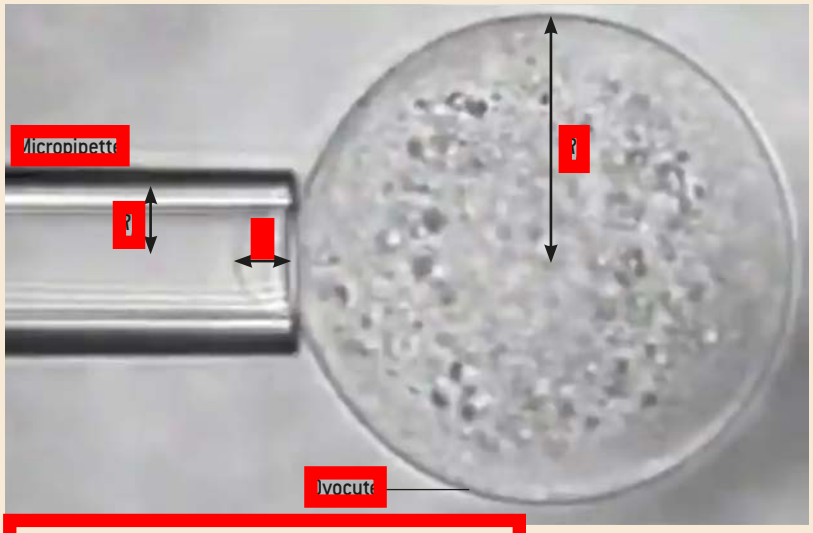
Or à ses pôles, le fuseau s'appuie contre la périphérie de la cellule grâce à des échasses de longueur variable – des microtubules dits astraux. Aussi le fuseau se positionne-t-il de façon variable au sein de la cellule. Plus précisément, il s'appuie sur la couche de protéines qui tapisse la paroi interne de la cellule, le cortex.

On peut donc penser que celui-ci n'est pas mou à cette étape. Imaginez-vous marchant avec des échasses sur un matelas gonflable : vous ne tiendriez pas longtemps debout ! Et de fait, le tout premier événement de la division, avant même la formation du fuseau, est une augmentation de la rigidité du cortex de la cellule, qui devient alors très ronde. À la fin de la division, la tension du cortex de la cellule rediminue et la cellule reprend sa forme initiale.

Le casse-tête de l'œuf mou

Mais dans le cas de l'ovocyte, tout est à repenser, car il s'agit d'une cellule très particulière. L'ovocyte doit se diviser pour former une cellule qui ne porte plus que la moitié du génome. Ainsi, lorsqu'un spermatozoïde, également porteur d'une moitié de génome, le fécondera, l'embryon formé portera un génome entier. Surtout, la division de l'ovocyte est très asymétrique en taille : il forme une très grosse cellule, qui contient toutes les réserves nécessaires au développement de l'embryon, et une toute petite cellule qui dégénère *(voir l'encadré pages 46 et 47)*. Or l'ovocyte n'a pas de microtubules astraux. Son fuseau ne peut donc pas se positionner en s'appuyant

Mesurer la tension des ovocytes



Alors qu'une cellule se divisant par mitose est entourée d'autres cellules qui produisent des contraintes physiques sur ses parois, l'ovocyte qui l'enveloppent dans l'ovaire – les cellules du follicule ovarien – pendant les divisions de la méiose

Les contraintes qu'il subit sont donc très différentes. L'ovocyte se comporte comme une goutte liquide qui tend à minimiser sa surface de contact avec son environnement. Or en mécanique des fluides, une équation – la loi de Laplace – relie la tension de surface d'une goutte liquide à sa courbure et à la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur de la goutte. Par conséquent, si l'on mesure la courbure de l'ovocyte et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, on obtient sa tension de surface T_c (ou la tension de son cortex, car celle de sa membrane est négligeable). Pour ce faire, on aspire l'ovocyte avec une micropipette. La loi de Laplace devient alors : $\Delta P = 2T_c(1/R_p - 1/R_c)$, où R_p et R_c sont les rayons de la pipette et de l'ovocyte, et ΔP la pression critique à laquelle la partie aspirée ne se déforme plus. Cette pression est déterminée à l'aide de la longueur L de la partie aspirée, et le tour est joué.

sur le cortex, comme les autres cellules. Pourtant, il se rapproche bien d'un bord. Comment ? C'est ce que j'ai voulu comprendre en m'intéressant à ce cas extrême de division asymétrique, chez la souris.

Si les ovocytes ne présentent pas de microtubules astraux, on sait depuis longtemps que, dans ces cellules, le positionnement du fuseau dépend d'une autre protéine, l'actine, capable de s'organiser en filaments. L'actine forme un « superfuseau », une sorte de cage faite de filaments qui entourent le fuseau.

Lorsque je commence cette thèse, on vient de découvrir que les ovocytes ne durcissent pas, mais, au contraire, se ramollissent pendant leur division. Une question se pose donc : qu'est-ce qui permet au fuseau de se positionner en périphérie de la cellule ? Par ailleurs, Jessica Azoury, une ancienne doctorante, a découvert qu'au moment de la division de l'ovocyte, une couche très épaisse d'actine se forme sous le cortex de la cellule, ce qui suggère un cortex durci, l'actine étant une protéine capable d'engendrer de la tension. Comment le cortex se ramollit-il donc ? C'est sur cette question que Marie-Émilie me propose de me pencher, en juillet 2010, par téléphone, car je suis alors en vacances dans le sud-ouest de la France. Je suis tout de suite emballée par le projet.

La première chose à faire, quand il s'agit de forces, c'est d'en parler avec un physicien. « Mes » physiciens, ceux avec qui j'ai travaillé, sont Cécile Sykes et Clément Campillo, de l'institut Curie, à Paris. Ils se sont intéressés au projet et nous avons décidé de collaborer. Pour cela, nous avons observé des ovocytes ayant une couche de filaments d'actine au cortex, et d'autres qui n'en présentaient pas. Jessica a constaté que cette couche dépendait d'une protéine nommée mos : dans des ovocytes issus de souris mutantes dépourvues de cette protéine, la couche d'actine ne se forme pas. Le fuseau reste alors au centre et les ovocytes se divisent de façon symétrique.

À l'institut Curie, Clément et moi avons passé des heures dans une pièce sombre à mesurer la tension du cortex d'ovocytes normaux et d'ovocytes dénués de cette couche d'actine. Pour effectuer cette mesure, nous aspirons les ovocytes dans une micropipette : la façon dont ils se déforment lors de cette aspiration permet de calculer la tension *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Surprise : ce sont bien les ovocytes ayant le plus d'actine qui sont les plus mous. Comment est-ce possible ? En réalité, l'actine engendre une tension quand elle est associée à une autre protéine, la myosine-II. Cette dernière forme de petits filaments qui peuvent s'accrocher à l'actine, tirer dessus et créer ainsi des forces, comme celles que produisent les muscles.

J'ai donc décidé de regarder ce qu'il advenait de la myosine-II pendant le ramollissement de la cellule. Dans une cellule normale, quand la cellule durcit au début de la division, la myosine-II est recrutée au cortex, où il y a un peu d'actine, et c'est cela qui permet à la cellule de durcir. Pour observer ce qui se passe, j'injecte une sonde fluorescente spécifique de la myosine-II dans l'ovocyte (cette technique délicate consiste à planter une pipette très fine dans la cellule sans la tuer), puis je filme l'ovocyte grâce à un microscope qui détecte la fluorescence. Et là, je constate que le ramollissement de l'ovocyte est concomitant à un retrait de la myosine-II du cortex.

Il me faut maintenant comprendre pourquoi la myosine-II s'en va.

Remonter la piste de la protéine mos

Comme nous l'avons vu, la protéine mos, qui est synthétisée quand la division commence, est nécessaire à la présence et à l'épaississement de l'actine au cortex. Mais est-elle suffisante ? Pour le savoir, j'injecte mos dans un ovocyte qui n'a pas entamé sa division et constate que cette injection suffit pour créer une couche d'actine au cortex de la cellule et chasser la myosine-II de celui-ci. La présence de mos est donc nécessaire et suffisante pour former la couche d'actine. Je montre aussi que, chez des souris mutantes qui n'expriment pas mos, on trouve de la myosine-II dans le cortex. Par conséquent, lorsque mos est présente, il y a de l'actine et il n'y a pas de myosine-II. Il me reste à chercher s'il existe un lien entre la présence de l'actine et l'absence de la myosine-II.

L'AUTEURE

Agathe CHAIGNE est chercheuse postdoctorale au MRC-Laboratory for molecular cell biology, au University College London. Elle a été lauréate en 2015 du prix *Le Monde* de la recherche universitaire.

Cet article est adapté du chapitre « Mécanique de la cellule et œuf mollet » d'Agathe Chaigne paru dans l'ouvrage *Cédric Villani présente les lauréats du prix Le Monde de la recherche*, Le Pommier, 2016.

Chercher la protéine qui contrôle la protéine qui contrôle la protéine qui fait que c'est mou

ndépendamment de la présence ou de l'absence de mos.

C'est un peu compliqué à tester : il faut parvenir à modifier l'actine sans modifier la myosine-II, ou l'inverse. Nous avons une première idée : inhiber la myosine-II (certaines molécules permettent d'y parvenir) et observer si cela suffit pour que de l'actine apparaisse au tout début de la division, quand mos n'est pas encore là. Ça ne fonctionne pas.

On imagine alors le scénario inverse : au lieu de vérifier si l'absence de myosine-II induit l'apparition de l'actine, nous décidons de vérifier si la présence de l'actine induit la disparition de la myosine-II du cortex. Mais comment nous y prendre ? Pour nous assurer que mos ne joue aucun rôle, il nous faut former des filaments d'actine au cortex au début de la division, avant l'apparition de mos. Nous devons donc découvrir comment l'actine est polymérisée au cortex.

Plusieurs protéines peuvent polymériser de l'actine. En observant des ovocytes dépourvus de certaines de ces protéines ou des ovocytes traités pour inhiber l'une ou l'autre de ces protéines, Jessica, Claudia (une stagiaire de Master 1), Marie-Émilie et moi finissons par conclure que la coupable est Arp2/3, une protéine souvent responsable de la polymérisation d'actine au cortex des cellules.

Arp2/3 a toujours besoin d'être activée par d'autres protéines, les NPF (*Nucleating Promoting Factors* ou facteurs promouvant la nucléation). Il y en a beaucoup – Wave1, Wave2, Wasp, Wash, N-Wasp… –, et elles ont toutes un petit motif en commun : une petite séquence d'acides aminés (les éléments qui constituent les protéines) cruciaux pour activer Arp2/3. Nous décidons donc

Modéliser la migration du fuseau

Pourquoi, lors de la division de l'ovocyte, la migration du fuseau vers un bord de la cellule dépend-elle de la mollesse du cortex, la couche épaisse d'actine q[ui] [...] demandé de l'aide aux physiciens théoriciens Raphaël Voituriez, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, et Nir Gov, de l'institut Weizmann, en Israël.

Nous avons envisagé plusieurs hypothèses et, pour chacune, nos collègues physiciens ont construit un modèle que nous avons ainsi affiné peu à peu.

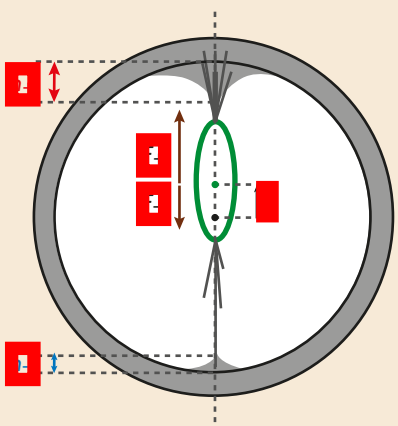
La première hypothèse que nous avons faite stipulait que si la tension du cortex restait élevée, le mouvement du fuseau devait être très lent. Un premier modèle a été construit décrivant cette idée. Puis nous nous sommes rendu compte que le fuseau ne semblait pas bouger du tout. Nous avons donc introduit cette idée dans le modèle.

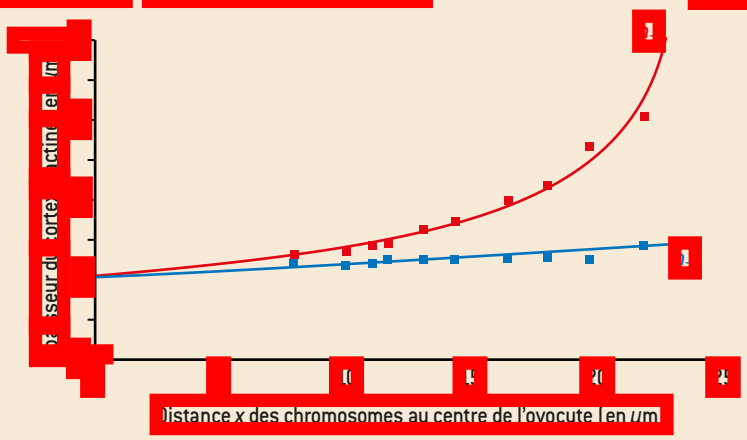
De même, au début, nous avons considéré que les filaments d'actine étaient symétriques de chaque côté de la cage d'actine qui enserre le fuseau. Puis nous avons constaté qu'en réalité, plus le fuseau est proche du cortex, plus l'actine est abondante du côté du fuseau proche du cortex. Nous avons donc rajouté cette [...] au modèle.

Enfin, nous avons pris en compte le fait que si le cortex est mou, les filaments d'actine peuvent être tirés plus facilement hors du cortex. Ou, plus exactement, que les filaments provenant de la cage d'actine pouvaient pénétrer le cortex plus facilement aussi (ce qui revient au même en terme d'équations, mais est plus complet d'un point de vue biologique, puisqu'on ne sait pas vraiment ce qui se passe à l'interface de la cage d'actine et du cortex).

Au fil des ajustements, nous avons abouti à l'hypothèse suivante : le fuseau *(ci-dessous en vert)* est tiré des deux côtés par la myosine-II, ce qui produit des forces F_+ et F_-. Le cortex se déforme de h_+ d'un côté et de h_- de l'autre. Sur le graphe, les points sont les paramètres mesurés ; les deux courbes sont prédites par le modèle et ajustées en fonction des points expérimentaux.

- A. C





d'injecter ce petit motif dans les ovocytes, espérant ainsi activer Arp2/3.

C'est un échec : nous obtenons bien une polymérisation de l'actine, mais partout dans la cellule et pas seulement au cortex. Qu'à cela ne tienne : j'ajoute à ce petit motif une séquence qui devrait l'envoyer en périphérie de la cellule. Échec. J'essaie un autre motif, puis un autre. Toujours rien. Pendant que je suis en vacances, Marie-Émilie, en désespoir de cause, lance une bouteille à la mer avant de renoncer : elle colle la séquence de ce motif à une protéine, l'ezrine, qui est toujours située au cortex dans les ovocytes, et injecte l'ensemble. Ça marche ! Le petit motif est envoyé au cortex et il y déclenche la polymérisation de l'actine par Arp2/3… Et cela suffit à chasser la myosine-II. Nous vérifions qu'en injectant juste l'ezrine, sans notre motif, nous ne modifions pas la tension cellulaire et que les cellules se divisent normalement.

Nous avons ainsi démontré que c'est bien la présence de l'actine qui est responsable de la disparition de la myosine-II du cortex et donc de la baisse de la tension corticale. Pourquoi n'est-ce pas le cas dans les cellules classiques, celles qui se divisent de façon symétrique, me direz-vous ? C'est un grand mystère. Peut-être est-ce dû à l'épaisseur de leur cortex, de quelques centaines de nanomètres, bien inférieure à celle du cortex des ovocytes, qui atteint parfois quatre micromètres. Ou à la structure même du cortex, qui diffère dans les deux types de cellules…

Mais revenons aux ovocytes, car il reste encore une question : comment mos entraîne-t-elle la polymérisation de l'actine ? Pour y répondre, nous nous tournons vers la littérature qui existe sur mos et Arp2/3. Quelques études ont montré que des protéines activées par mos, nommées ERK1/2, sont capables d'activer Wave2, une des protéines NPF, qui peut elle-même activer Arp2/3 en lui ajoutant un groupement phosphate. Est-ce aussi le cas dans les ovocytes ? Pour répondre à cette question, nous faisons l'inventaire – en les purifiant – des protéines présentes dans des ovocytes normaux ou privés de mos, et nous recherchons la présence du groupement phosphate dans la fraction obtenue. Nous obtenons qu'en présence de mos, ERK1/2 est présent et Wave2 est activé (phosphorylé), alors qu'en l'absence de mos, Wave2 n'est pas activé. Cela suggère fortement que Wave2 est l'intermédiaire entre mos et Arp2/3.

Pourquoi il est important que ce soit mou

J'ai donc compris comment le cortex devenait mou. Mais finalement, est-ce important ? Pour répondre à cette question, il faut trouver une façon de durcir le cortex. Il existe un composé, la concanavaline-A, qui durcit le cortex des ovocytes. Et lorsqu'on traite des ovocytes avec ce composé, le fuseau ne migre pas. Le cortex doit donc bien être mou pour que la division ait lieu. En ayant lu ce qui précède, vous ne serez pas étonné d'apprendre que l'obtention de ce résultat, le plus important de ma thèse, aura nécessité cinq mois de tâtonnements pour trouver les conditions parfaites d'utilisation de la concanavaline-A !

Évidemment, il nous a fallu ensuite comprendre pourquoi la migration du fuseau dépendait de la mollesse du cortex. Ce fut le moment de faire appel à des physiciens théoriciens – Raphaël Voituriez, de l'université Pierre-et-Marie-Curie à Paris, et Nir Gov, de l'institut Weizmann en Israël –, qui nous ont proposé différents modèles correspondant aux diverses hypothèses *(voir l'encadré page ci-contre)*. Concrètement, je leur présente les faits connus et les inconnues. Pour chaque scénario possible, ils nous proposent un modèle (ce qui correspond à une mise en équations) ; nous les orientons ensuite en fonction de nos résultats et de ceux publiés par d'autres groupes.

Après quelques tâtonnements, l'hypothèse que nous formulons est la suivante : l'emplacement où le fuseau se forme est un peu excentré dans l'ovocyte ; puis il est attaché au cortex par la cage d'actine. Au départ, un pôle est donc déjà plus proche du cortex que l'autre. La myosine-II étant présente aux pôles de la cage d'actine, elle tire le fuseau vers le cortex, un peu plus fort du côté le plus proche du pôle. Puis vient l'action de mos. Le cortex se ramollit alors et se déforme sous la traction du fuseau, ce qui permet aux filaments d'actine aux extrémités de la cage de pénétrer plus facilement dans le cortex, augmentant ainsi la traction du fuseau et permettant sa migration complète jusqu'au cortex.

C'est un modèle qu'il faut essayer de démontrer. À cette fin, tous les mécanismes qui lui sont associés sont mis en équations. Il faut alors contraindre le modèle, c'est-à-dire minimiser le nombre de paramètres que l'on ne connaît pas. Pour y parvenir, je mesure certains des paramètres, par exemple la déformation du cortex des deux côtés du fuseau en fonction de la migration de celui-ci.

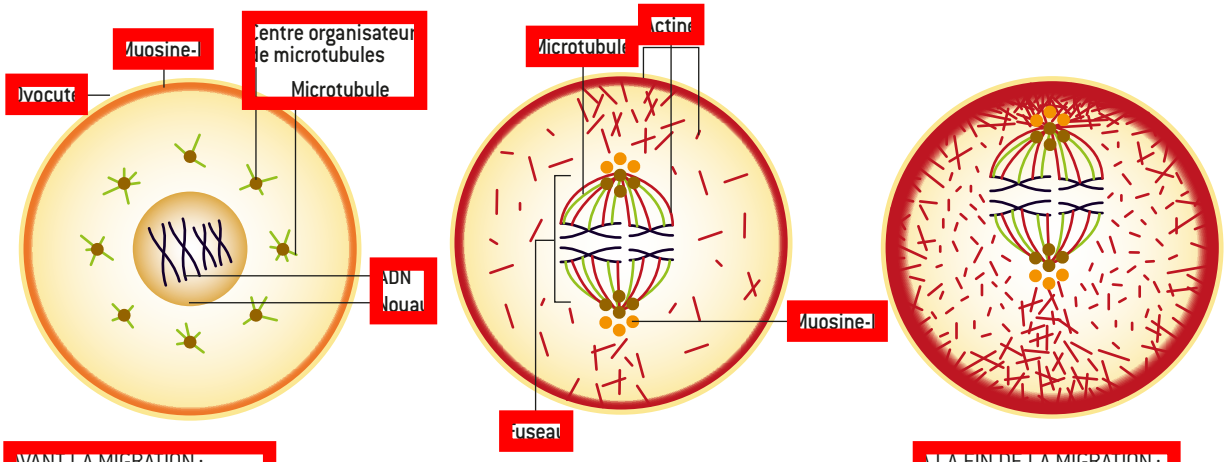
Une fois qu'un maximum de paramètres sont ajoutés au modèle, il faut tester ce dernier. Pour ce faire, je vérifie si le modèle prédit des valeurs pour d'autres paramètres que nous pouvons mesurer. En comparant plusieurs prédictions à nos mesures, j'arrive à la conclusion que notre modèle semble très fidèle à la réalité.

Finalement, les physiciens remarquent que le modèle donne aussi des prédictions sur la migration du fuseau en fonction de la valeur de la tension du cortex : si la tension est trop élevée, le fuseau ne peut pas migrer (cela, je l'avais déjà démontré) ; et si elle est trop basse, le fuseau ne

Ce fut le moment de faire appel à des physiciens théoriciens

LE MODÈLE DE L'ŒUF MOLLET

Dans l'ovocyte de souris, le positionnement asymétrique du fuseau durant la métaphase I de la méiose est le fruit d'un déséquilibre de forces favorisé par un ramollissement du cortex. À la fin de la prophase I *(à gauche)*, le cortex est rigide et le fuseau se forme légèrement excentré. C'est le début de la métaphase I *(au centre)*. Puis des filaments d'actine arriment le fuseau au cortex et la myosine-II, présente aux pôles du fuseau, tire celui-ci en s'appuyant sur le réseau d'actine. La traction est un peu plus forte sur le pôle le plus proche du cortex. Devenu mou, le cortex se déforme et s'enrichit en filaments d'actine sur lesquels tire la myosine-II des pôles *(à droite)*. La traction est ainsi amplifiée du côté le plus proche.



AVANT LA MIGRATION : OVOCYTE DUR
La myosine-II est localisée dans le cortex de l'ovocyte. Avec l'actine du cortex, elle rigidifie la paroi de la cellule.

AU DÉBUT DE LA MIGRATION : RAMOLLISSEMENT
Des filaments d'actine sont polymérisés au cortex et chassent la myosine-II.

À LA FIN DE LA MIGRATION : OVOCYTE MOU
Les filaments d'actine sont très abondants au cortex, tandis que la myosine-II a disparu.

migre pas non plus, car le cortex est trop mou pour supporter la tension du fuseau – c'est comme si l'on essayait d'escalader une paroi rocheuse en s'aidant d'une corde plantée dans un élastique.

Un cortex ni trop dur ni trop mou

Pour tester cette seconde prédiction, il faut diminuer la tension du cortex. Or nous avons déjà l'outil pour y parvenir : notre petit motif qui, associé à l'ezrine, déclenche la polymérisation de l'actine au cortex ! Je retourne voir Clément et, ensemble, nous vérifions que l'injection de ce motif couplé à l'ezrine dans l'ovocyte suffit à ramollir ce dernier ; puis je confirme que, dans ce contexte, le fuseau ne peut pas migrer. Pour faire une bonne division asymétrique, il faut donc un cortex ni trop dur ni trop mou, mais mollet !

Toutes ces observations montrent que le modèle décrit très bien la réalité et nous pouvons donc en conclure que nos hypothèses initiales étaient correctes *(voir l'encadré ci-dessus)*.

À la fin d'une thèse, on se pose souvent plus de questions encore qu'au début. En ce qui me concerne, la plus importante d'entre elles, qui n'a pas encore de réponse à ce jour, est celle de l'absence de microtubules astraux dans l'ovocyte. Pourquoi cette machinerie disparaît-elle ? Pourquoi y a-t-il un positionnement dépendant de l'actine et de la tension du cortex ? Est-ce parce que ce système existe qu'il n'y a pas de microtubules astraux, car ils sont alors inutiles, ou bien est-ce au contraire l'absence des microtubules qui rend la présence de ce système nécessaire, l'absence des microtubules pouvant être expliquée par un tout autre mécanisme ?

Une autre question intéressante concerne la suite du développement embryonnaire après la fécondation par un spermatozoïde. Il n'y a toujours pas de microtubules astraux, et pourtant la première division est symétrique. Pour le comprendre, j'ai décidé de poursuivre mes recherches après ma thèse (en arrivant régulièrement au labo à cinq heures du matin, car, malheureusement pour la chercheuse et son mari, les cellules des

BIBLIOGRAPHIE

A. Chaigne, **Cortical stiffness : a gatekeeper for spindle positioning in mouse oocytes,** Thèse soutenue le 4 juillet 2014, disponible sur : http://bit.ly/2f1miOM

A. Chaigne *et al.*, **Ramollir le cortex : un prérequis à l'asymétrie de la division ovocytaire,** Médecine/Sciences, vol. 30, n° 1, pp. 18-21, 2014.

M. Piel et J.-F. Joanny, **L'arrondissement des cellules en mitose,** *Médecine/Sciences*, vol. 27, n° 6-7, pp. 590-592, 2011.

embryons se divisent à des moments précis, très tôt le matin) et j'ai découvert que, comme dans l'ovocyte non fécondé, le fuseau de l'ovocyte fécondé est entouré d'une cage d'actine qui est tirée par la myosine-II à ses pôles et ancrée dans un cortex qui durcit au lieu de ramollir, ce qui permet de centrer le fuseau. Cela signifie donc que ce mécanisme dépendant de la présence de l'actine pourrait en fait être un mécanisme universel pour positionner les fuseaux dans les cellules dépourvues de microtubules astraux (par exemple chez les bactéries ou dans les cellules végétales).

Symétrie et ruptures

Comment l'ovocyte réussit-il à rompre sa parfaite symétrie pour faire une division asymétrique ? Il me semble que la réponse réside dans le concept d'équilibre instable. Imaginez une balle placée en haut d'une colline : elle est en équilibre, mais, si vous la bougez un tant soit peu, elle dévalera la pente – sa position initiale constitue ce que l'on appelle un « pic de potentiel ». Dans le cas de l'ovocyte, l'équilibre instable repose sur la position du noyau contenant les chromosomes avant la formation du fuseau. Le fuseau se forme là où se trouve le noyau. Avant la division, le noyau est positionné au centre de la cellule, mais, quelle que soit la précision du système de positionnement, il sera toujours très légèrement décentré, ce qui provoquera la rupture de symétrie.

De nombreuses ruptures de symétrie reposent sur le fait que de toutes petites fluctuations aléatoires peuvent être amplifiées. Finalement, une toute petite asymétrie ou la fluctuation de l'orientation d'une protéine dans l'espace suffit sûrement à expliquer pourquoi vous avez le cœur à gauche et le foie à droite…

Quant à moi, j'ai finalement décidé de continuer à faire de la recherche. Je suis partie à Londres, au University College London, et j'y étudie la manière dont de petites fluctuations dans le milieu mécanique des cellules permettent de contrôler la géométrie de leur division. La suite au prochain épisode… ■

SUR LE WEB

Le site de George von Dassow, biologiste de l'université de l'Orégon, aux États-Unis, rassemble de superbes images et films de division cellulaire : http://www.gvondassow.com

Des voix de synthèse presque humaines

Nicolas Obin et Axel Roebel

La parole n'est plus le privilège des humains. Aujourd'hui, grâce aux avancées scientifiques et techniques, la voix donnée aux machines peut imiter à la quasi-perfection celle d'une personne réelle.

Miroir de l'âme pour Aristote, la voix est le moyen d'expression le plus singulier de l'être humain. Elle est constitutive de notre identité et exprime, dans ses inflexions et ses intonations, notre personnalité et nos émotions. La parole était propre à l'homme, mais plus maintenant : au cours des deux dernières décennies, les voix de synthèse se sont multipliées et représentent aujourd'hui un enjeu majeur des technologies numériques et de l'économie associée.

La voix de synthèse, l'une des clés de voûte de l'interaction homme-machine, insuffle une « persona », une « âme » à la machine, et définit les contours de sa personnalité. Dans un futur proche, les voix de synthèse seront partout, à commencer dans notre poche, mais nous serons sans doute bien en peine de les différencier de celles de nos semblables.

Les géants du numérique Google, Apple, Microsoft et Amazon sont les fers de lance des grands groupes industriels qui investissent massivement dans la recherche et le développement des technologies numériques liées à la synthèse de la parole. Nos téléphones sont déjà capables d'obéir à nos paroles, mais aussi de nous répondre avec une voix de synthèse. L'avenir est aux assistants personnels, des intelligences artificielles dévolues à notre service et au contrôle des objets connectés de notre domicile, toujours à notre écoute et apprenant à répondre à nos moindres besoins. Tel est le cas des assistants I/O de Google, Siri d'Apple, Cortana de Microsoft et Alexa d'Amazon.

Ces questions mobilisent de nombreux laboratoires de recherche, à l'université de Cambridge en Angleterre, à l'université d'Édimbourg en

L'ESSENTIEL

- Dans la parole, deux caractéristiques essentielles sont le timbre de la voix et la prosodie (accentuation, phrasé, intonation, ruthme).
- En créant ou modifiant ces caractéristiques, à l'aide d'outils numériques appropriés, on crée ou transforme à volonté une voix.
- On peut aussi reconstituer une voix perdue ou en inventer d'inédites. Les voix aujourd'hui obtenues ainsi paraissent très naturelles.
- Les applications de ces procédés se multiplient

LES TECHNIQUES NUMERIQUES, notamment la numérisation des sons illustrée ici, jouent un rôle crucial dans l'analyse et la synthèse de la voix.

Écosse, à l'université de Carnegie Mellon aux États-Unis, à l'Institut des sciences et technologies de Nara au Japon... Parmi ces acteurs mondiaux, l'Ircam (Institut de recherche et coordination acoustique-musique), à Paris, se distingue par le lien qu'il entretient entre l'innovation technologique et le monde de la culture, du divertissement et de la création de contenus (musique, cinéma, jeux vidéo, etc.).

Alors que les géants du numérique et d'autres laboratoires se sont longtemps contentés de voix synthétiques intelligibles et standardisées pour des usages spécialisés, les chercheurs de l'Ircam ont depuis les années 1980 focalisé leurs efforts sur ce qui rend une voix humaine – son grain, son ton, sa personnalité, son expressivité.

Au cours de la dernière décennie, grâce notamment aux travaux de l'équipe Analyse et synthèse des sons, de l'Ircam, on est passé de voix de synthèse intelligibles, mais mécaniques, à des voix de synthèse naturelles et expressives. Cette rupture a été rendue possible par un ensemble d'avancées scientifiques réalisées en traitement du signal, en apprentissage automatique et en linguistique. Aujourd'hui, nous reproduisons plus fidèlement le grain de la voix grâce à l'amélioration des algorithmes d'analyse et de synthèse de la parole. Par ailleurs, nous maîtrisons mieux la prosodie de la voix et son lien avec la syntaxe d'un texte, ce qui a considérablement amélioré le naturel des voix de synthèse. Enfin, les méthodes d'apprentissage automatique et l'augmentation de la capacité des ordinateurs ont été déterminantes pour concrétiser ces avancées et apprendre à la machine à parler (les bases de données contenant dorénavant des heures d'enregistrements pour une voix, et ce pour des milliers de voix différentes).

Aujourd'hui, des logiciels développés à l'Ircam sont utilisés dans des productions cinématographiques. Ils permettent de sculpter la voix pour en modifier son grain, son ton, son identité et sa personnalité. Nous transformons facilement une voix d'homme en celle d'une femme, une voix jeune en une voix plus âgée, et inversement. Nous sommes également capables de convertir notre voix pour imiter celle d'une autre personne. Nos ordinateurs et nos téléphones sont dotés de voix de synthèse naturelles, expressives et personnalisables, capables de prononcer n'importe quel texte.

Demain, il sera possible de rendre leur voix à des personnes ayant perdu l'usage

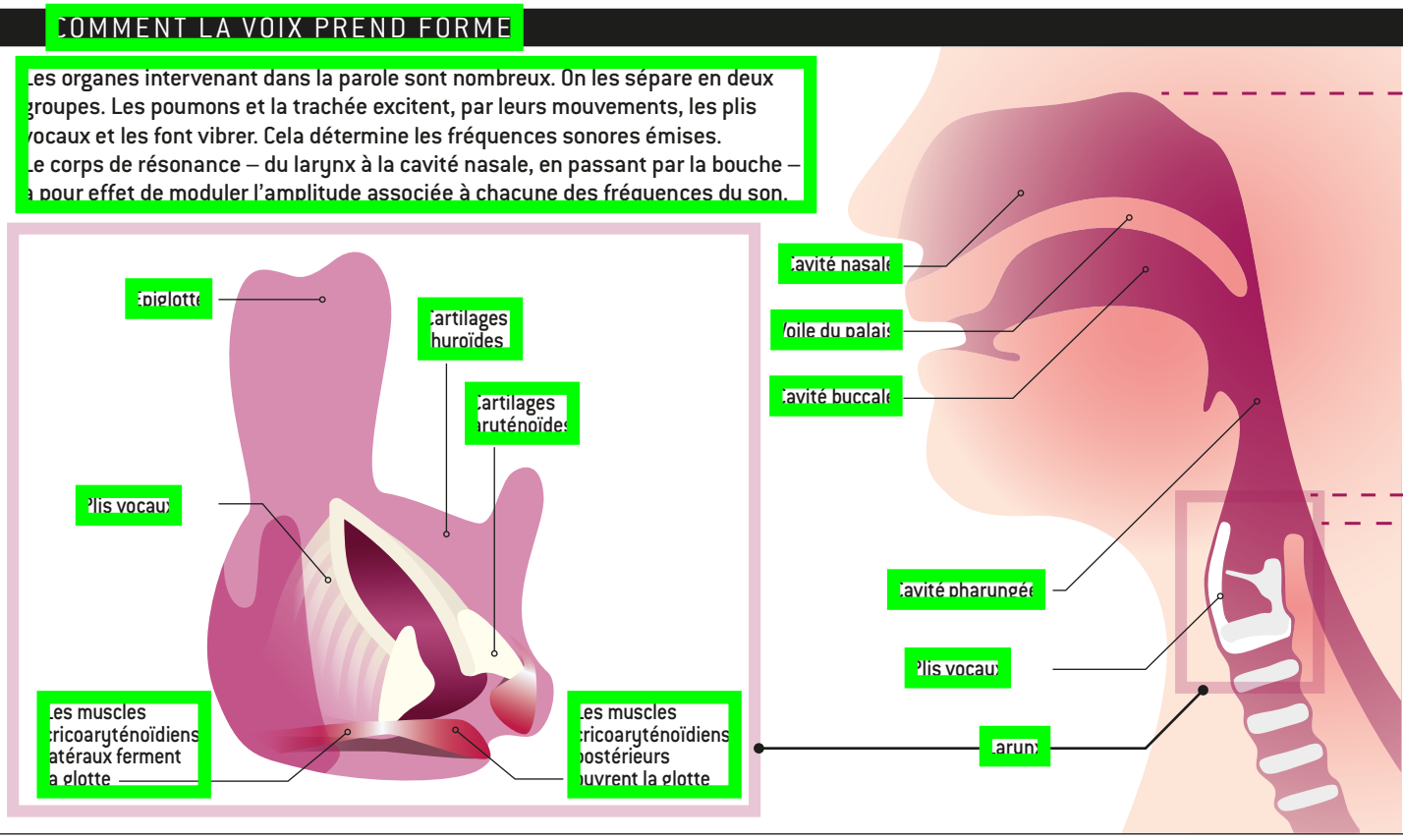
LES AUTEURS

Nicolas OBIN est maître de conférences à l'université Pierre-et-Marie-Curie (Sorbonne Universités) et chercheur dans l'équipe Analyse et synthèse des sons de l'Ircam, à Paris.

Axel ROEBEL est chercheur et responsable de l'équipe Analyse et synthèse des sons de l'Ircam.

COMMENT LA VOIX PREND FORME

Les organes intervenant dans la parole sont nombreux. On les sépare en deux groupes. Les poumons et la trachée excitent, par leurs mouvements, les plis vocaux et les font vibrer. Cela détermine les fréquences sonores émises. Le corps de résonance – du larynx à la cavité nasale, en passant par la bouche – a pour effet de moduler l'amplitude associée à chacune des fréquences du son.



de la parole *(voir l'encadré page 61)*, de parler dans une autre langue, mais avec sa propre voix *(voir l'encadré page 60)*, de changer de voix comme on change de coiffure, d'interagir au quotidien avec des robots dotés d'une personnalité vocale indiscernable de celle d'un être humain. Ces progrès scientifiques seront sans doute au cœur d'une bataille technologique, commerciale et éthique. Mais pour y parvenir, les chercheurs devront bien comprendre la singularité de la voix humaine et la maîtriser.

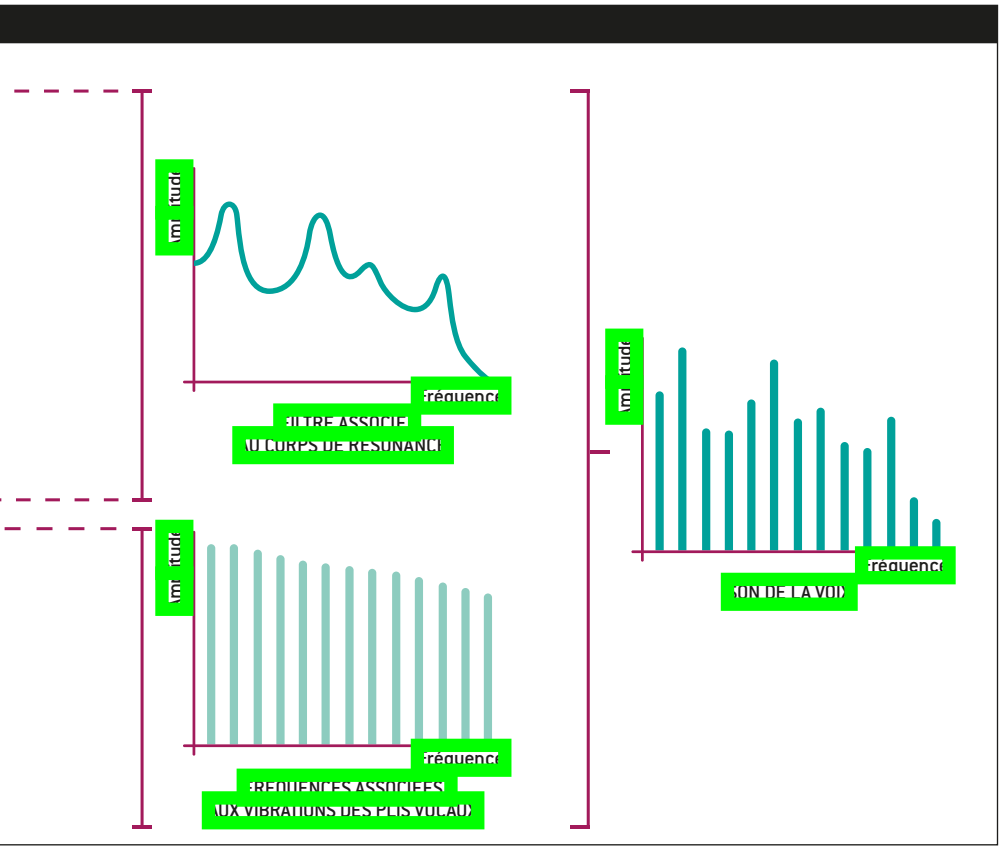
Comment la voix est-elle produite ? La source d'émission est constituée de plis vocaux – nommés aussi, de façon trompeuse, cordes vocales (ils ne ressemblent pas à des cordes). Ces plis, situés dans la gorge au niveau de la glotte, sont mis en vibration par l'air que les poumons insufflent à travers la trachée. Ces vibrations entraînent des variations de la pression de l'air, qui se propagent et produisent un son à une certaine fréquence dite fondamentale, la hauteur de la voix, et ses multiples, les harmoniques *(voir l'encadré ci-dessous)*.

L'irrégularité des vibrations, la tension des muscles autour des plis vocaux, la quantité d'air qui circule ainsi que les turbulences d'air engendrées modifient la « qualité » du son émis (voix douce ou tendue, pressée, soufflée, craquée, rauque, cassée, etc.).

Le son émis au niveau de la glotte se propage à travers le conduit vocal (la trachée, puis les cavités buccales et nasales), lequel sert de corps de résonance, amplifie et colore le son. L'effet produit est celui d'un « filtre » qui module l'amplitude des composantes fréquentielles du son. La voix acquiert ainsi une coloration, un « timbre » particulier. L'anatomie propre à chaque personne rend son timbre unique, qui constitue une sorte de signature vocale.

Qui plus est, la coloration du son émis dépend de la configuration des articulateurs de la bouche (les lèvres, la langue et le voile du palais). Le contrôle de ces configurations fait de l'appareil vocal un instrument de communication. Ainsi, chaque langue est pourvue d'un ensemble de sons spécifiques nommés phonèmes, qui en constituent les unités élémentaires. Le français en compte un peu plus d'une trentaine : les voyelles et sons apparentés, comme dans « on » ou « un », les consonnes et sons apparentés occlusives comme *b*, *d* ou *p*, fricatives comme *f*, *ch* ou *s*, etc.).

Lorsqu'une personne parle, elle est capable de contrôler et de modifier en permanence la configuration de son appareil vocal. Ainsi, les articulateurs de la bouche se déplacent en permanence et articulent les phonèmes pour former des syllabes, des mots, des phrases. Également, la dynamique de la glotte et des plis vocaux permet de contrôler la prosodie, ou « musique de la voix ». Elle se traduit par des variations de hauteur, d'intensité, de rythme et de qualité vocale. Son évolution au cours du temps construit, organise et module le sens des mots et des phrases, indique nos origines géographiques et socioprofessionnelles, et traduit nos intentions et nos émotions.



Sculpter la voix

L'identité d'une voix est donc constituée de deux composantes propres à chaque individu : le timbre et la prosodie. Pour changer l'identité ou la personnalité d'une voix, il faut alors être capable de modéliser ces composantes afin de pouvoir les reproduire et les modifier. À cette fin, les chercheurs de l'Ircam ont développé en 2010 le logiciel nommé IrcamTools TRAX. À partir d'un signal sonore issu d'un enregistrement ou d'un microphone, des traitements numériques modifient la hauteur de la voix pour obtenir une voix plus grave ou plus aiguë, ou le filtre de la voix pour en modifier le timbre. Il est alors très facile de transformer une voix d'homme en voix de femme (et inversement), la voix d'un adulte en une voix d'adolescent ou de personne âgée...

En effet, les hommes et les femmes ont des caractéristiques physiologiques (taille, corpulence) qui imposent des différences au niveau de leur appareil phonatoire, et donc de leur voix. Les hommes ont des plis vocaux plus longs (de 17 à 25 millimètres) et un conduit vocal plus grand (17 centimètres en moyenne). La conséquence est que les voix d'homme sont caractérisées par une faible hauteur (de 70 à 160 hertz) et un timbre « grave ». Les femmes ont des plis vocaux plus courts (12,5 à 17,5 millimètres) et un conduit vocal plus court (14 centimètres en moyenne). Une voix de femme sera donc plus haute (de 130 à 300 hertz) et son timbre sera plus « aigu ». En outre, la voix d'une personne évolue au cours de sa vie, à l'instar de son corps. Les adolescents ont une voix aiguë qui devient plus grave à l'âge adulte, puis qui remonte au cours de la vie.

Ainsi, agir au moyen d'un logiciel sur la hauteur et le timbre d'une voix crée l'illusion

d'un changement de sexe ou d'âge. La reproduction des spécificités vocales des personnages âgées, telles que le chevrotement de la voix, nécessite d'affiner les traitements numériques réalisés. L'âge est généralement marqué par des dysfonctionnements dans la mécanique de l'appareil vocal : les plis vocaux se distendent, ce qui a pour effet d'augmenter le souffle et de faire apparaître un déraillement dans la voix, le chevrotement.

Plus surprenant, il est possible de créer des voix non humaines, voire fantastiques, par exemple faire parler une personne avec une voix de lion. Cette transformation est réalisée à partir d'un enregistrement de voix humaine et d'un rugissement de lion, en substituant l'empreinte sonore des plis vocaux d'un lion à celle des plis vocaux de la voix humaine, tout en conservant le corps de résonance humain. Le résultat est stupéfiant : on entend une voix humaine dont on comprend clairement le sens, mais avec le souffle et les rugissements d'un lion !

Les ingénieurs de production dans le monde du cinéma et des films d'animation utilisent couramment ces traitements numériques pour modifier la voix d'un acteur ou créer des personnages imaginaires.

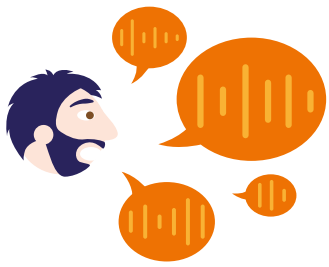
L'étape suivante, aujourd'hui devenue réalité, consiste à reproduire la voix d'acteurs ou de personnalités historiques. Ainsi, à l'Ircam, nous sommes aujourd'hui régulièrement sollicités pour ressusciter des voix à partir d'archives sonores.

Parler avec la voix d'un autre

La prosodie et le timbre font l'identité d'une voix. Mais quelle est la contribution de ces deux caractéristiques sonores lors d'une imitation ? Lorsqu'une personne A (Alice)

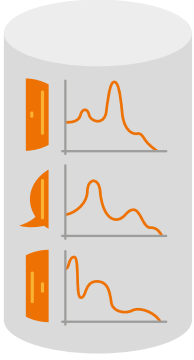
TRANSFORMATION DE L'IDENTITE DE LA VOIX

Les techniques actuelles permettent de transformer la voix d'une personne en celle d'une personne célèbre, d'une personne plus jeune, plus âgée ou même en celle d'un monstre. Dans l'exemple ci-dessous, la voix d'Alice est transformée en celle de Bernard. Les barres symbolisent la prosodie et le fond coloré des bulles, le timbre.



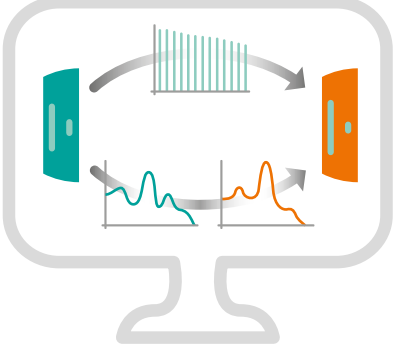
1. ENREGISTREMENT DE BERNARD
Cette étape consiste à récupérer plusieurs heures de paroles prononcées par Bernard.

2. DECOUPAGE EN PHONEMES
Un logiciel analyse les paroles de Bernard, isole les phonèmes et détermine le filtre vocal associé au timbre de chaque phonème.



3. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES
Les phonèmes sont classés avec le filtre vocal associé.

4. ENREGISTREMENT D'ALICE
Alice dit le texte à transformer. Si l'objectif est d'obtenir la voix de Bernard, elle doit imiter sa prosodie. En revanche, elle ne peut imiter parfaitement son timbre.



5. ANALYSE ET TRANSFORMATION
Chaque phonème d'Alice est isolé et analysé. La prosodie est conservée tandis que le filtre vocal associé au timbre d'Alice est remplacé par celui de Bernard.

6. ASSEMBLAGE DES PHONEMES
La voix obtenue conserve la prosodie d'Alice, mais avec le timbre de Bernard.

cherche à imiter la voix d'une personne B Bernard), elle joue principalement sur sa prosodie pour reproduire celle de B et ses spécificités. En revanche, il lui est plus difficile de contrefaire son timbre : les dimensions du conduit vocal étant déterminées par la physiologie, il est propre à chaque individu. Ainsi, même les imitateurs les plus doués ne sont pas en mesure de reproduire le timbre d'une voix avec précision et se limitent généralement à une imitation de la prosodie.

Pour imiter vocalement et de façon réaliste une personne, il est essentiel de reproduire aussi son timbre. Pour ce faire, la conversion d'identité de la voix consiste à créer une collection de « masques vocaux » de Bernard (la personne à imiter) à partir d'enregistrements de sa voix, puis d'appliquer ces masques vocaux sur la voix d'Alice. Nous devons ainsi collecter des enregistrements sonores de la personne à imiter pour créer une base de données de la voix à reproduire. Ces données sont ensuite découpées en phonèmes et analysées pour créer une signature acoustique de la voix à reproduire. Plus précisément, pour chaque phonème, on détermine un « masque vocal », c'est-à-dire le filtre vocal qui spécifie la répartition des amplitudes selon les fréquences du son *(voir la figure page 57)*. La conversion d'identité est alors un jeu de copier-coller des masques vocaux créés. Pour chaque phonème émis par Alice, il faut sélectionner le filtre du phonème correspondant dans la base de données de la voix de Bernard, puis le substituer au filtre d'Alice.

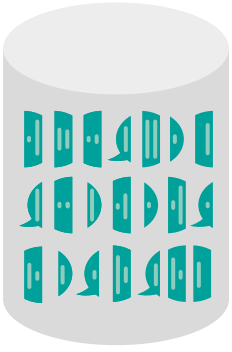
Un algorithme sélectionne dans la base de données de la voix d'Alice la séquence de filtres vocaux qui garantira la meilleure conversion d'identité de la voix. La voix a alors le timbre de la personne à imiter…

CRÉATION D'UNE VOIX DE SYNTHÈSE

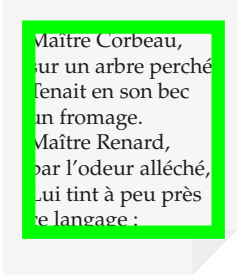
Les voix de synthèse existaient déjà, mais elles étaient mécaniques et peu naturelles. Grâce aux progrès récents, elles deviennent naturelles et expressives

1. ENREGISTREMENT D'ALICE
La voix d'Alice est enregistrée pendant quelques heures.

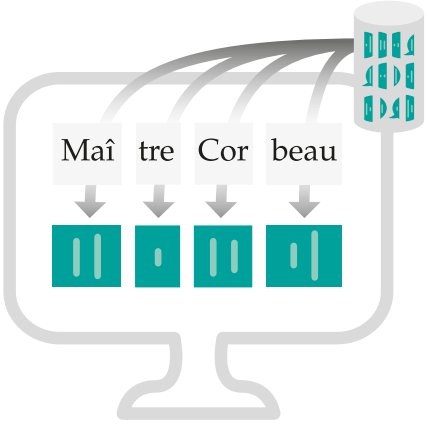
2. DÉCOUPAGE EN UNITÉS
Un logiciel analyse les paroles d'Alice et les découpe en phonèmes, syllabes, mots, etc., et analyse la prosodie et le timbre.



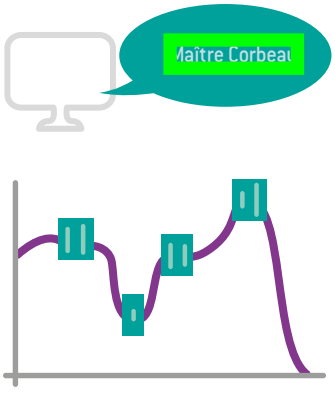
3. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNÉES
Plus la base est importante, plus la voix créée sera naturelle et expressive.



4. TEXTE À VOCALISER
Le texte est analysé et converti en une séquence de phonèmes, syllabes, etc.



5. SÉLECTION DES UNITÉS
S'il existe plusieurs versions d'une unité dans la base, on sélectionne celui dont le timbre et la prosodie s'adaptent le mieux au contexte dans la phrase.



6. CONCATÉNATION
Un algorithme retouche localement le signal afin de lisser la transition entre les unités et gomme les imperfections de la voix de synthèse.

Cette technique a été utilisée en première mondiale pour reconstruire les voix de Marilyn Monroe (dans le film *Marilyn*, de Philippe Parreno, 2012), du maréchal Pétain (dans le documentaire *Juger Pétain*, de Philippe Saada, 2014), et de Louis de Funès (dans le film *Pourquoi j'ai pas mangé mon père*, de Jamel Debbouze, sorti en 2015). Un comédien dont la mission était d'imiter la prosodie et le jeu de Louis de Funès sur le texte du personnage dans le film a été enregistré en plusieurs séances. Parallèlement, une base de données d'une dizaine de minutes de la voix de Louis de Funès a été constituée à partir d'une collection d'enregistrements historiques.

Les chercheurs ont alors pu convertir le timbre du comédien à partir de la signature vocale de Louis de Funès. L'effet est saisissant : Louis de Funès semble avoir été enregistré aujourd'hui, mais avec sa voix des films des années 1970.

Un puzzle vocal

Les chercheurs de l'Ircam repoussent encore les limites de la manipulation vocale grâce à la synthèse de la parole. Ici, il n'est plus question de transformer une voix à partir d'un enregistrement, mais bien de créer une voix de synthèse capable d'exprimer n'importe quel texte *(voir l'encadré page 59)*.

Les premières tentatives de synthèse de la parole remontent au XVIIIe siècle, le siècle des automates et des machines parlantes. Avec l'avènement de l'électricité, au XXe siècle, les machines se modernisent et se perfectionnent (tel le « Voder », pour *Voice Operation Demonstrator*, fabriqué en 1939 par les laboratoires Bell), puis s'automatisent avec l'arrivée des ordinateurs. Ainsi, le synthétiseur de l'IBM 704, conçu par les laboratoires Bell en 1962, est connu pour avoir inspiré la voix de l'intelligence artificielle HAL dans le film *2001, l'Odyssée de l'espace* de Stanley Kubrick.

Aujourd'hui, les systèmes de synthèse de la parole sont totalement automatiques et offrent la possibilité de personnaliser les voix numériques. La synthèse de la parole repose essentiellement sur l'utilisation de bases de données de voix, et plusieurs heures d'enregistrement sont nécessaires pour créer une voix de synthèse. Car contrairement à la conversion de voix, la synthèse ne se limite pas à modifier les caractéristiques d'une voix existante. Il faut avoir à disposition toutes les briques élémentaires pour reconstituer intégralement le langage et prononcer n'importe quel texte. La plupart des synthétiseurs actuels fonctionnent par « sélection d'unités » dont le principe est similaire à un jeu de puzzle.

Chaque pièce est un morceau de voix (phonème, syllabe, mot, etc.) dont la prosodie et le timbre lui sont spécifiques. La base de données sert alors de réservoir de pièces de puzzle qui doit couvrir au mieux la variabilité acoustique de la voix à créer. Pour synthétiser un texte, il faut alors chercher et réassembler les pièces destinées à reconstituer le texte. La construction du puzzle relève cependant du casse-tête : des algorithmes trient une immense masse de pièces de puzzle, chacune ayant une signature sonore spécifique qui n'autorise pas à les accoler simplement les unes aux autres. La réalisation du puzzle textuel nécessite de trouver les pièces qui, mises bout à bout, se correspondent au mieux.

Afin qu'une voix de synthèse paraisse naturelle, il est indispensable de s'assurer de l'intelligibilité du texte en associant parfaitement les phonèmes. Il faut également s'assurer de la forme d'ensemble des pièces du puzzle, la prosodie. La qualité de la restitution dépend de la taille des bases de données : le grand nombre de pièces sonores disponibles pour chaque fragment de voix garantit la bonne connexion des

Un interprète dans votre poche

De voyage au Japon, vous souhaitez converser avec un habitant. Vous dégainez votre téléphone, parlez en français dans le [illegible] quasi instantanément en japonais ! Votre interlocuteur fait de même en vous répondant dans sa propre langue traduite en français par votre téléphone.

Ce scénario est d'ores et déjà possible grâce aux logiciels d'interprétation qui ont vu le jour en 2009 au sein du projet européen EMIME (www.emime.org) et développés parallèlement par IBM, Google ou Mobile Technologies avec l'application Jibbigo.

Leur fonctionnement repose sur une chaîne d'actions. Le message vocal capté par le micro est tout d'abord retranscrit sous forme de texte par un module de transcription. Le texte est alors traduit vers la langue cible par un module de traduction avant d'être prononcé par un module de synthèse et finalement émis par le haut-parleur du téléphone. Le module de traduction réalise la traduction à partir de règles, de la même manière que le ferait un interprète humain. Cependant, ces règles sont difficiles à formuler explicitement. Ainsi, plutôt que de fournir au module un ensemble limité de règles à appliquer, celles-ci sont apprises par un ordinateur à partir d'un ensemble composé d'une multitude d'exemples de textes écrits dans les deux langues. De la même façon que Champollion eut appris à décrypter les hiéroglyphes, en partie grâce à la pierre de Rosette sur laquelle était gravé un même texte écrit en trois langues, l'ordinateur va par lui-même déduire les méthodes pour passer d'une langue à l'autre. Contrairement à la pierre de Rosette, la quantité d'exemples disponibles pour l'apprentissage de ces règles, collectés entre autres sur Internet, est quasi illimitée et grandit de jour en jour.

De même, les modules de transcription et de synthèse sont en mesure de retranscrire la parole en texte et de le prononcer au moyen de méthodes apprises à partir de livres audio par exemple, mais ce n'est pas tout. Lorsque nous rencontrons une personne pour la première fois, si elle a un fort accent et si l'environnement est bruyant, la compréhension est difficile dans les premières minutes de discussion, mais s'améliore rapidement. Ainsi, à partir de quelques secondes de parole, le module de transcription s'ajuste à la voix de l'utilisateur, à sa manière de parler, mais également à l'environnement acoustique (lieu calme ou bruyant) afin d'améliorer ses performances. Cette capacité d'adaptation est également partagée par le module de synthèse qui produit de la parole à partir d'un texte avec une voix ayant des caractéristiques acoustiques semblables à celle de l'utilisateur. Nous sommes dorénavant doués pour parler le japonais (ou toute autre langue) sans l'avoir jamais appris…

– **Pierre Lanchantin**
Machine Intelligence Laboratory, université de Cambridge

phonèmes et la richesse prosodique de la voix. Le rendu final est obtenu par des retouches locales automatiques qui visent à rendre les connexions imperceptibles et à lisser le phrasé.

Les avancées scientifiques réalisées depuis le début des années 2000 en linguistique, en traitement du signal et en apprentissage automatique ont conduit à une amélioration sans précédent de la modélisation de la prosodie en synthèse de la parole. Nous sommes ainsi passés d'une voix de synthèse intelligible à une voix de synthèse naturelle et expressive.

La frontière entre le réel et l'artificiel se réduit, à l'exemple de la voix de l'acteur André Dussolier que nous avons recréée dans le cadre de l'exposition « La Voix » organisée en 2014 à Paris, à la Cité des sciences et de l'industrie). La voix réelle et la voix artificielle sont devenues indifférenciables, au dire de l'acteur lui-même.

À partir de milliers de voix différentes, et grâce aux possibilités offertes par l'apprentissage automatique, il est également possible de créer une voix artificielle « moyenne », de créer des voix hybrides à partir de plusieurs voix et d'adapter le style, l'accent, ou l'émotion d'une voix.

Le principe est similaire à celui de la synthèse par sélection d'unités, mais la différence est considérable. Au lieu d'utiliser les morceaux réels d'une voix pour créer une voix de synthèse, on représente

À la recherche de la parole perdue

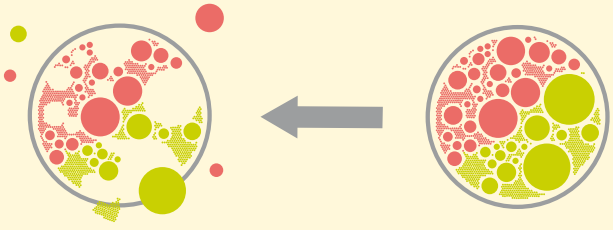
Certaines maladies neurologiques dégénératives, liées au vieillissement ou d'origine génétique, affectent la parole jusqu'à la rendre complètement inintelligible [illegible] intellectuelles et cognitives.

Ainsi par exemple, le physicien Stephen Hawking est atteint d'une sclérose latérale amyotrophique, aussi nommée maladie de Charcot, dont les conséquences sont la dégénérescence des motoneurones du cortex cérébral et qui l'empêche d'articuler le moindre son. Il communique grâce à l'un des premiers systèmes de synthèse de la parole, conçus dans les années 1970. Le timbre robotique de la voix de synthèse utilisée par Stephen Hawking a fini par s'identifier complètement à la figure du physicien.

Cependant, de nouvelles techniques créent désormais des voix de synthèse personnalisées qui conservent les principales caractéristiques de l'identité vocale du patient telles que le timbre, l'intonation ou l'accent. Ces techniques utilisent un modèle simplifié de la production vocale. Selon ce modèle, la voix est le produit d'une excitation (souffle issu des poumons et vibration des cordes vocales) filtrée par les résonances du conduit vocal. Les différents paramètres tels que la fréquence de vibration des cordes vocales ou les résonances du conduit vocal peuvent être représentés, en fonction de chaque phonème prononcé et de son contexte linguistique, grâce à des modèles statistiques appris à partir des enregistrements de la voix. Ces modèles statistiques caractérisent en quelque sorte l'empreinte vocale du locuteur. Grâce à de puissants outils d'apprentissage automatique, les algorithmes apprennent à modéliser une voix sur la base de quelques minutes d'enregistrement seulement. Cependant, il arrive fréquemment qu'une personne ne prenne conscience de la nécessité d'enregistrer sa voix que lorsque celle-ci commence à être dégradée par la maladie. Le défi est alors d'être capable de recréer une voix de synthèse claire et intelligible à partir d'une source dégradée ou peu intelligible.

L'équipe du CSTR, à l'université d'Édimbourg, est récemment parvenue à reconstruire la voix d'un patient en utilisant certaines parties de la voix d'un locuteur sain, qualifié de « donneur », et dont les caractéristiques vocales étaient suffisamment proches de celle du patient. Cette opération s'effectue non pas directement sur les enregistrements des voix, mais en « mélangeant » en partie les modèles statistiques appris à partir de ces enregistrements. Le principe, illustré par la figure ci-dessous, repose ainsi sur le remplacement de certaines composantes « défectueuses » du modèle statistique de la voix du patient par celles du donneur. Des modules d'analyse statistique sont utilisés pour détecter les parties à corriger. Cette méthode, testée sur plus d'une cinquantaine de patients, en collaboration avec la clinique Anne Rowling à Édimbourg, utilise le plus souvent les voix des proches du patient (frère, sœur ou enfants). Pour tous ces patients, l'utilisation d'une voix de synthèse personnalisée leur a permis de conserver leur identité vocale et de jouir d'une qualité de communication améliorée avec leur entourage.

– Christophe Veaux
Centre for Speech Technology Research, université d'Édimbourg



LA RECONSTRUCTION DE LA VOIX consiste à remplacer les composantes biaisées du modèle de voix du patient *(à gauche)* par leurs homologues du modèle du locuteur sain *(à droite)*. Par exemple, si certains phonèmes sont mal articulés, on modifiera le modèle de voix du patient pour l'articulation de ces phonèmes en prenant comme référence les valeurs correspondantes du modèle du locuteur sain.

À qui appartiendra une voix de synthèse créée à partir de voix humaines ?

ntégralement la voix sous la forme d'un modèle statistique, qui en réalise une abstraction mathématique capable de reproduire et de régénérer l'intégralité d'une voix de synthèse. Ainsi, la loi de distribution statistique (moyenne et variance pour une distribution gaussienne) permet de modéliser la répartition de chaque phonème dans l'espace acoustique des paramètres de la voix (hauteur, durée, intensité, timbre).

Afin de modéliser l'évolution temporelle des paramètres de la voix, des modèles statistiques séquentiels (tels que les « chaînes de Markov cachées ») sont par ailleurs utilisés : chaque phonème est alors segmenté en « états », par exemple début, milieu et fin, chaque état étant soumis à sa propre loi statistique.

Le formalisme statistique permet alors de manipuler ces « abstractions » par combinaison, interpolation et adaptation des paramètres statistiques dans l'espace des voix. On peut par exemple créer une voix hybride à partir des paramètres statistiques de deux voix réelles, de créer une voix moyenne résultant de la combinaison de milliers de voix, etc. Cette évolution technique étend considérablement les possibilités de la synthèse de la parole à partir du texte : elle ne se limite plus nécessairement à une voix réelle et s'adapte alors rapidement pour créer une nouvelle voix de synthèse à partir de quelques minutes d'enregistrement seulement. Ainsi, il est déjà possible de recréer la voix d'une personne ayant perdu l'usage de la parole à partir de quelques minutes d'enregistrement de sa voix *(voir l'encadré page 61)*, ou de faire parler une personne dans une autre langue avec sa propre voix *(voir l'encadré page 60)*.

Pour impressionnants que soient les progrès, les voix de synthèse restent encore imparfaites et l'intervention humaine est toujours nécessaire pour obtenir une bonne qualité de conversion et de synthèse. La révolution en cours de l'intelligence artificielle, de l'apprentissage profond par réseaux de neurones artificiels et des données massives devrait entraîner une nouvelle vague d'avancées.

Dans la technique des réseaux de neurones artificiels, ou réseaux neuromimétiques, le dispositif matériel ou virtuel qui « apprend » est constitué de couches d'éléments, ayant chacun deux états possibles, connectées les unes aux autres par des liens dont les caractéristiques sont modifiées au cours du processus d'apprentissage par un algorithme approprié. De tels réseaux, censés imiter les processus naturels d'apprentissage se déroulant dans le cerveau, ont fait leur entrée dans l'apprentissage automatique dans les années 1970. Mais leur développement s'est heurté à des limitations théoriques et algorithmiques, ainsi qu'aux faibles capacités des machines de l'époque.

L'apprentissage profond est en marche

Les avancées théoriques réalisées au cours de la dernière décennie et l'augmentation considérable de la puissance des ordinateurs ont remis cette technique sur le devant de la scène. Ainsi, de nouveaux algorithmes d'apprentissage ont été conçus pour des réseaux de neurones « profonds » (constitués de nombreuses couches, chacune formée de nombreux neurones), l'apprentissage portant sur une quantité massive de données. Ces techniques laissent espérer que, dans les prochaines décennies, on créera des voix numériques indiscernables des voix réelles, dans n'importe quelle langue, et personnalisables selon les besoins.

Demain, nous sculpterons notre propre voix et nous interagirons quotidiennement avec des machines intelligentes dont la voix sera indiscernable de celle d'un humain – cet ultime « miroir de l'âme ». *Deus* ou *diabolus ex machina* ? Ces avancées ne sont pas sans contrepartie et soulèvent des questions fondamentales sur la place des voix de synthèse et des machines humanisées dans nos sociétés.

Ainsi, à qui appartiendra une voix de synthèse créée à partir de voix humaines ou obtenue par conversion d'une autre voix ? À l'individu imité ? À l'individu transformé ? Aux chercheurs et aux ingénieurs qui ont rendu possible cette réalisation ? Et comment distinguer la voix synthétique de la voix réelle ? Comment authentifier l'auteur d'un message dont on peut contrefaire la voix ? L'humanisation des voix de synthèse, à l'instar de l'apparence visuelle des robots, pose également question. Avec des machines pourvues de voix trop humaines, ne faisons-nous pas un pas dans la « vallée dérangeante » dont nous avertissait le roboticien japonais Masahiro Mori ? ■

BIBLIOGRAPHIE

A. van den Oord *et al.*, **WaveNet : A generative model for raw audio**, *Proceedings of Interspeech*, San Francisco, 2016 (https://deepmind.com/blog/wavenet-generative-model-raw-audio/).

K. Tokuda *et al.*, **Speech synthesis based on hidden Markov models**, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Langage Processing*, vol. 101 (5), p. 1234-1252, 2013.

N. Obin, **MeLos : Analysis and modeling of speech prosody and speaking style**, thèse de doctorat, Ircam-UPMC, 2011.

J. W. Mullennix et S. E. Stern (éd.), **Computer Synthesized Speech Technologies : Tools for Aiding Impairment**, IGI Global, 2010.

Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

Plus de 24% de réduction

OFFRE DÉCOUVERTE

12 nos par an

4,90€ PAR MOIS

SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

❑ **OUI**, je m'abonne à *Pour la Science* **formule Découverte.** Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**

(IPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Tél. Pour le suivi client (facultatif)

E-mail obligatoire :

@

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31/12/2016 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre les 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 :

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 - 8 rue Férou - 75006 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

GROUPE POUR LA SCIENCE - Siège social : 8 rue Férou 75278 Paris cedex 06 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 301 797 393 - Siret : 301 797 393 000 15 - APE 5814Z

Les précieux vélins du Muséum

Pour le plaisir des yeux, une exposition inhabituelle et un livre magnifique offrent l'occasion de découvrir trois siècles d'illustration naturaliste à travers la singulière collection de vélins du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Cécile Lestienne

La bibliothèque centrale du Muséum abrite un fragile et inestimable trésor : 6 998 vélins naturalistes conservés dans 107 portefeuilles de maroquin rouge, rangés à plat dans des armoires sécurisées, à la température et l'hygrométrie soigneusement contrôlées. Car les vélins sont des peaux de veau mort-né à la blancheur et à la transparence inégalables, un merveilleux support sur lequel, dans de bonnes conditions, les couleurs ne fanent jamais. Ces chefs-d'œuvre ne voient jamais ou presque la lumière du jour, tant ils sont vulnérables. D'où l'idée de les numériser pour les rendre accessibles au public et aux chercheurs. Un long chantier (il a fallu trois ans à un technicien de la RMN, la Réunion des musées nationaux, pour photographier l'ensemble de la collection) dont l'institution célèbre l'achèvement par une exposition * qui permet exceptionnellement aux visiteurs d'admirer de près une quarantaine de ces précieuses illustrations. Tandis que, pour l'occasion, les éditions Citadelles & Mazenod publient avec le Muséum un très bel ouvrage sous la direction scientifique des commissaires de l'exposition, Pascale Heurtel et Michelle Lenoir *(voir page 71)*, reproduisant plus de 800 vélins. Majestueux ours blanc, délicats papillons, coquillages nacrés, oiseaux au chatoyant plumage, émouvante tortue de La Réunion à jamais éteinte… Et, surtout, des centaines de fleurs et de plantes : tulipes, iris, amaryllis, mandragore et cactus, poivrons et aubergines… plus vrais et plus beaux que nature. Un somptueux aperçu de cette collection unique au monde entamée au XVII^e^ siècle par Gaston d'Orléans, frère de Louis XIII, puis enrichie par le Roi-Soleil, avant d'échoir à la Révolution au tout nouveau Muséum d'histoire naturelle, où elle sert d'outil pédagogique aux professeurs, jusqu'à ce que la photographie et les progrès de l'édition dépouillent les vélins de leur utilité scientifique. Mais certainement pas de leur qualité esthétique.

* **Précieux vélins - Trois siècles d'illustration naturaliste.** Cabinet d'histoire du Jardin des plantes, 57 rue Cuvier, Paris 5^e^. Jusqu'au 13 janvier 2017. Tous les jours de 10 heures à 17 heures. Tarif plein : 3 euros. Détails sur www.mnhn.fr

ENTRE SCIENCE ET ART

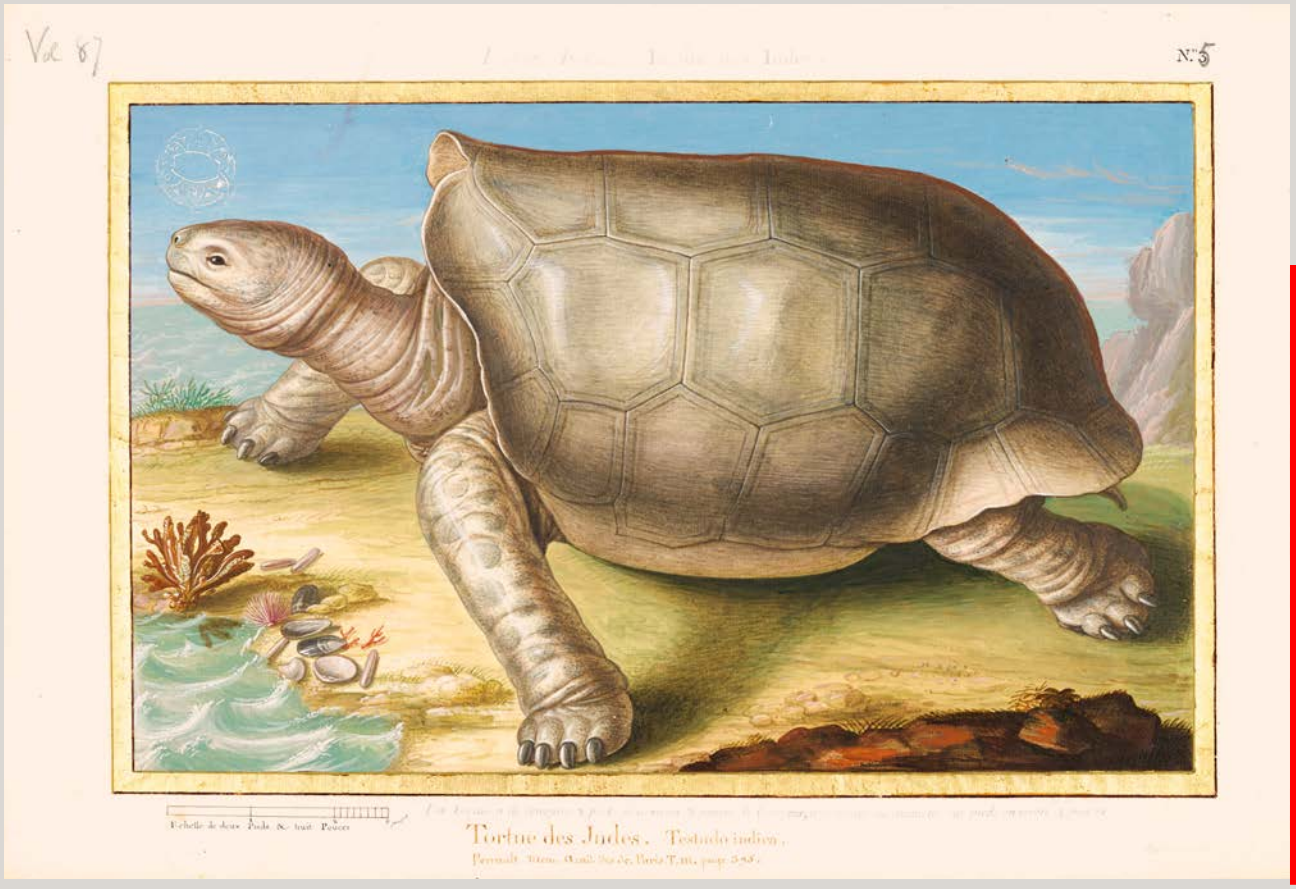
Cultivé, artiste à ses heures, féru de botanique et d'ornithologie, Gaston d'Orléans, frère rebelle de Louis XIII, collectionne les plantes rares et les oiseaux exotiques. Vers 1630, il engage Nicolas Robert, un jeune peintre, fils d'aubergistes de Langres, pour représenter sur vélins la faune et la flore de ses jardins. L'objectif ? Reproduire de manière scientifique les plus beaux spécimens de sa collection par essence éphémère, comme cette amaryllis et cet hémante écarlate originaires d'Afrique du Sud. Mais aussi fournir des modèles d'ornementation florale aux brodeurs, tapissiers et autres orfèvres à une époque où la mode est aux vêtements et aux meubles luxuriants.

A. B.

A. Amaryllis belladona. (L'Herit.) } Cap.
B. Hæmanthus coccineus. (Linn.) }

TRÉSOR ROYAL

À sa mort, Gaston d'Orléans lègue ses vélins à son neveu Louis XIV, qui, encouragé par Colbert, poursuit la collection en commandant de nouveaux dessins à des peintres talentueux dont on connaît mal la vie et la pratique. « Probablement parce que les illustrateurs naturalistes n'appartiennent pas alors à l'élite artistique », avance la cocommissaire de l'exposition Pascale Heurtel. Ainsi, on n'a pas retrouvé le nom de l'auteur de ces rougeoyants piments en cours d'acclimatation en France. Même la biographie du fameux Nicolas Robert, passé au service du Roi-Soleil, reste fort incomplète, alors qu'il a laissé dans la collection royale 477 peintures de fleurs et 262 d'animaux.

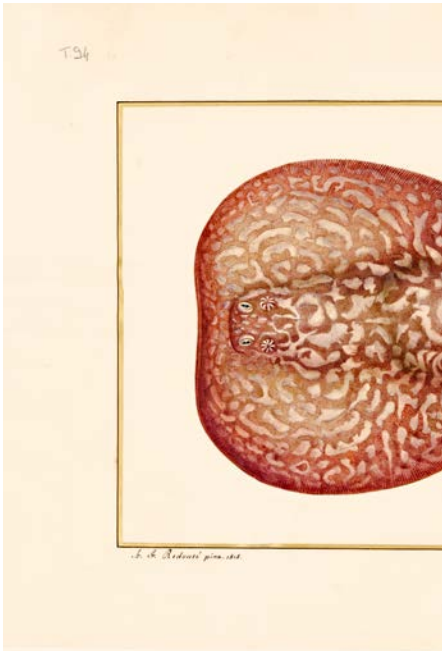


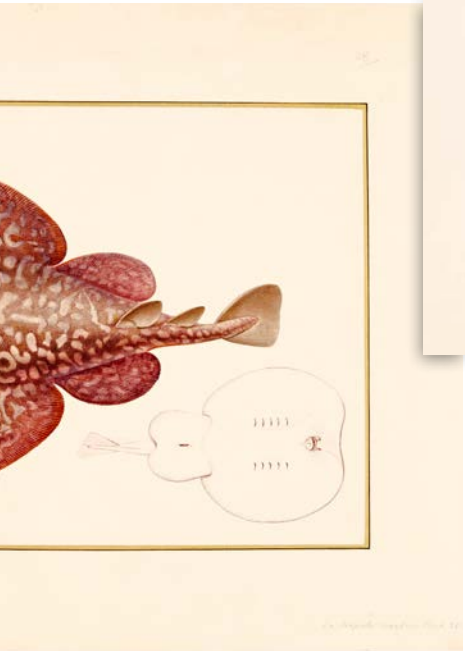
CURIOSITÉS

Intérêt historique : on trouve dans la collection quelques représentations d'espèces ou de variétés aujourd'hui disparues, telle cette tortue géante endémique de La Réunion, peinte par le Champenois Claude Aubriet, artiste naturaliste sous Louis XIV puis Louis XV. Son élève, Madeleine Basseporte, fille d'un marchand de vin puiné, est une illustratrice fort estimée de Buffon. Celui-ci est nommé, en 1739, intendant des jardins du roi, qui deviendront le futur Muséum d'histoire naturelle. Reconnue pour sa technique, Madeleine Basseporte donne des leçons aux princesses royales, filles de Louis XV, et peint, jusqu'à l'âge avancé de 80 ans, de très délicats vélins. Comme ce bézoard d'éléphant, une concrétion issue des organes digestifs des animaux, recherchée pour ses propriétés médicales, mais aussi objet rare de collection, qui devient sous son pinceau précis une image forte et étrange.

DES OUTILS PÉDAGOGIQUES...

Lorsque la collection de vélins est donnée au Muséum en 1793, les professeurs en font un instrument de travail. « Les bibliothécaires ne cessent de réclamer les œuvres que les savants ont empruntées, et des trous de punaise sur certains montrent qu'ils s'en servent pour leurs cours », raconte Pascale Heurtel ; « heureusement, à ma connaissance, un seul vélin a disparu. » Ces illustrations sont à la fois des modèles pour apprendre le dessin naturaliste et des outils pour remplacer l'animal ou la plante vivante que les savants ne peuvent mettre sous les yeux de leur auditoire. D'autant plus quand il s'agit de spécimens inconnus en Europe, comme ces koalas inspirés des aquarelles réalisées par un naturaliste anglais débarqué en Nouvelle-Zélande en 1800. Pourtant, la tradition veut que les artistes peignent d'après le vivant, grâce notamment aux animaux de la ménagerie du Jardin des plantes. Quitte à les placer dans des décors un peu fantaisistes : on se demande d'où viennent ces idoles placées dans ce paysage d'icebergs qui abrite l'ours blanc.





.. MAIS ONÉREUX

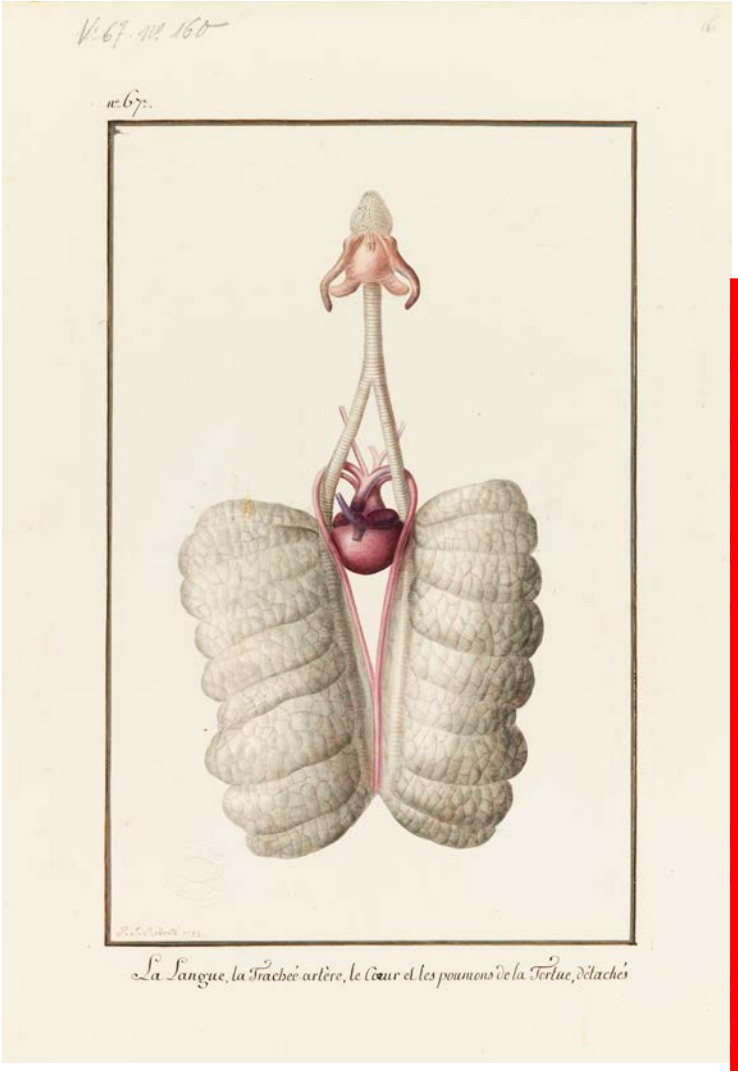
Ce sont les professeurs du Muséum qui décident en assemblée la commande des vélins. Et qui, à réception, acceptent solennellement l'entrée du parchemin dans la collection. « Le budget alloué à cette activité n'est pas anodin, commente Pascale Heurtel. Le tarif est de 100 francs pour un vélin de difficulté moyenne et, à titre exceptionnel, 200 francs pour un vélin remarquable. » Et certains artistes naturalistes sont des célébrités de leur époque, comme l'auteur de cette bignone de Chine, Pierre Joseph Redouté, surnommé le Raphaël des fleurs. Moins talentueux que son frère, Henri Joseph Redouté est l'un des rares artistes naturalistes voyageurs puisqu'il prend part à la campagne d'Égypte. Il peint notamment des poissons, comme cette torpille dont il rend parfaitement les couleurs rares et délicates qui disparaissent quand on sort l'animal de l'eau.

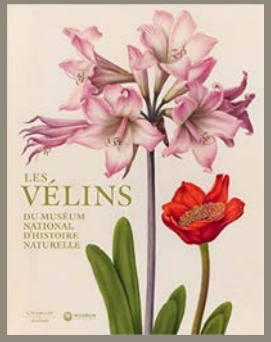
SANS REPENTIR

Le lumineux strombe géant dominant la mer transparente est l'œuvre d'Émilie Bounieu, dame Raveau. On reste stupéfait aujourd'hui devant la finesse de l'exécution de ces vélins. « Surtout que l'on connaît peu les techniques de ces artistes naturalistes, très mal documentées. C'est encore un champ de recherche à défricher », constate Pascale Heurtel. Tout juste sait-on que le dessin préparé sur un papier-calque est retranscrit sur la peau avec un crayon, sans jamais avoir droit à la gomme. Le fin pinceau de martre applique la gouache ou l'aquarelle en caressant le parchemin très soigneusement couche par couche. Une seule goutte tombe, et il se boursoufle, à jamais perdu. L'art du vélin n'autorise pas le repentir.

UN FORMAT UNIQUE

Depuis l'origine de la collection et les premiers dessins de Nicolas Robert, le format des vélins est fixé à 46 × 32 cm. Le dessin peut être horizontal ou vertical, mais il s'inscrit toujours dans un cadre doré, et des légendes calligraphiées à l'encre bleue ou à l'or fin viennent rehausser l'ensemble. Le décor est le plus souvent inexistant ; le spécimen représenté se détache sur un fond blanc, à l'aspect plus scientifique. Parmi ces planches, la botanique est très largement à l'honneur, suivie par la zoologie. Au XIX^{e} siècle, la collection des vélins devenue nationale s'ouvre à de nouvelles disciplines : la minéralogie, la paléontologie et l'anatomie comparée, promue par Georges Cuvier, comme on le voit avec cette dissection des poumons de la grande tortue, peinte par Pierre-Joseph Redouté.





Les Vélins du Muséum national d'histoire naturelle. Sous la direction scientifique de Pascale Heurtel et Michelle Lenoir.

524 pages, 830 illustrations

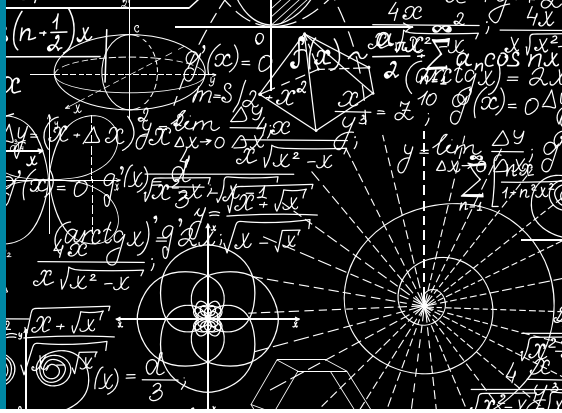
Relié sous jaquette et coffret illustré

Coédition Muséum/Citadelles & Mazenod, 430 euros €.

RENOUVEAU

À la fin du XIXe siècle, la qualité esthétique de ces images naturalistes, la transparence de la peau, la fraîcheur des couleurs, la finesse des détails ne sauvent pas les vélins du désintérêt. L'apparition de la photographie et de la micrographie leur fait concurrence, tandis que les progrès de l'édition et de la gravure se répandent. « Dans les années 1880, les professeurs en commandent encore entre 40 et 50 par an. Mais dès 1890, la production devient anecdotique », explique Pascale Heurtel. Aujourd'hui cependant, des considérations artistiques et historiques les remettent en lumière. Consultables en ligne (sur http://bit.ly/2dkUed7), ils n'ont pas fini de nous éblouir.

INDISPENSABLES MATHÉMATIQUES



Rendues incontournables par l'avènement de l'ère numérique, les mathématiques irriguent tous les secteurs de l'économie*, se nichent au cœur de révolutions telles que l'intelligence artificielle ou le traitement des données, interviennent dans la compréhension de problèmes majeurs de notre époque, comme ceux liés au développement durable, au climat, à la santé. Aujourd'hui, de nombreuses innovations sont redevables aux mathématiques. Un enjeu de développement dont doivent s'emparer étudiants, entrepreneurs et décideurs.
Des événements et des célébrations grand public nous rappellent l'omniprésence de cette science dans notre quotidien d'aujourd'hui… et de demain.

* Rappel utile : 15% du PIB et 9% des emplois sont impactés directement par les mathématiques (chiffres tirés de l'Etude de l'Impact Socio-Économique des Mathématiques, rapport CMI, mai 2015). C'est dire l'importance de cette discipline pour l'économie française.

Un forum où s'expriment de part et d'autre de nouveaux besoins

Le Forum Emploi-Maths 2016
le 15 décembre à la Cité des sciences de Paris-La Villette

Tant du point de vue des entreprises que de celui des formations, la disponibilité actuelle de certains experts est extrêmement tendue. Les besoins en *data scientists*, par exemple, ont explosé récemment également au sens des cursus universitaires délivrant ces formations). Par-delà cette demande globale pour des spécialistes en *big data*, l'intérêt des entreprises pour de nouveaux talents qui relèvent des sciences mathématiques va croissant. Justement, étudiants, entrepreneurs et décideurs se donnent rendez-vous au 5e Forum Emploi-Maths (FEM), pour échanger et approfondir leurs connaissances mutuelles. Y seront présents, entre autres, des experts dans le traitement de données (massives ou pas), le calcul haute performance, la modélisation et la simulation, la sécurité et la cryptographie ou encore l'imagerie et le traitement du signal.

Au FEM donc, venez découvrir les masters et docteurs en mathématiques aux côtés de nombreuses entreprises, tous avant des intérêts communs.

Avec plus de 1 800 participants lors de la 4e session, le FEM s'est imposé comme le rendez-vous français des mathématiques pour l'entreprise.

Au programme de cette 5e édition, les traditionnels stands des entreprises et des laboratoires, et aussi des conférences, des rencontres, des rendez-vous dédiés, des mathématicien(ne)s de toutes spécialités, des unités de formation, de la licence aux postdoctorats…

La Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI), la Société Française de Statistique (SFdS) et l'Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société (AMIES) coorganisent le Forum Emploi-Maths.

Des événements à retenir

EN 2016

- le 15 décembre à La Cité des sciences et de l'industrie, Porte de la Villette, Paris 19e : Le Forum Emploi-Maths 2016 www.forum-emploi-maths.org

EN 2017

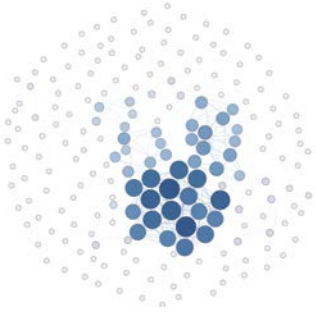
- les 2 et 3 février : le Forum des Mathématiques à Aix-en-Provence www.mathenpolis.fr/MP17crbst_30.htm
- du 13 au 17 mars : 6e Semaine des mathématiques dont le thème est «Mathématiques et langages» www.education.gouv.fr
- le 14 mars : le Pi Day, partout, par exemple à Marseille www.piday.fr
- les 18-19 mars : Forum Mathématiques Vivantes : à Lille, Lyon et Rennes
- du 23 mars au 1er avril : 6 congrès régionaux MATh.en.JEANS : Arras, Grenoble, Marseille, Nantes, Paris, Paul… www.mathenjeans.fr/Congres
- du 14 au 16 mai 2016 : Tournoi Français des Jeunes Mathématicien(ne)s à Palaiseau www.ttjm.org
- Mai : Le Salon Culture & Jeux Mathématiques à Paris

COMMUNIQUÉ

Cinq posters pour des mathématiques de pointe

Le Colloque Mathématiques, oxygène du numérique s'est tenu les 20 et 21 octobre à Jussieu. Il était organisé par l'IHP, la FSMP et AMIES, et a donné lieu à un concours de posters, mettant en lumière les travaux de jeunes mathématiciens. Son palmarès nous invite à découvrir cinq applications originales des mathématiques.

La statistique au service de la génétique



Quand la statistique rencontre la génétique, on peut espérer comprendre un peu mieux le fonctionnement des cellules, celui du génome, et – qui sait – trouver des solutions thérapeutiques aux maladies infectieuses et cancéreuses. Tel est l'objectif des travaux d'Emilie Devijver, postdoctorante à la Katholieke Universiteit Leuven et de Mélina Gallopin, maître de conférences à l'université Paris-Sud-Orsay. Ici, un graphe reconstituant le réseau d'interactions des gènes permet de détecter ceux qui sont les plus impliqués dans un mécanisme biologique donné.

Modèle markovien déterministe par morceaux pour la propagation de fissures

En aéronautique, les risques de défaillance des structures sont décuplés par l'environnement extrême dans lequel doivent fonctionner les composants. Le cumul de dizaines de milliers d'heures de vol conduit à l'apparition de fissures dont l'évolution dépend de leur taille, de leur emplacement ou encore du matériau touché. Florine Greciet, doctorante de l'université de Lorraine chez Safran Aircraft Engines, utilise les probabilités pour mieux comprendre les processus de propagation des fissures, identifier la contrainte admissible pouvant être supportée par une pièce donnée afin d'en améliorer la conception en amont ou les procédures de maintenance.

Reconstruction faciale et modélisation mathématique

Comment les mathématiques aident-elles à recréer le visage d'une personne à partir de son crâne ? L'approche décrite par Chiara Nardoni et Lydie Uro, doctorantes à l'Institut des Sciences du Calcul et des Données de l'UPMC, est fondée sur la modélisation mathématique, en particulier la conception et l'analyse de nouveaux modèles, et l'utilisation d'outils numériques, afin de développer des logiciels performants de reconstruction.

L'union fait la force : comprendre et prévoir les interactions entre protéines

Présentes dans nos cellules, les protéines lisent l'ADN, transmettent des signaux, reconnaissent les intrus indésirables, fabriquent d'autres protéines... Leur comportement dépend de leurs interactions. Émilie Neveu, postdoctorante en mathématiques numériques au Département des neurosciences fondamentales de l'université de Lausanne, développe des modèles de ces interactions, calcule la probabilité qu'ont les protéines d'entrer en relation, tâche d'en prédire les assemblages, le tout à l'aide d'outils mathématiques sophistiqués : optimisation, statistique, algorithmique, théorie de l'information...

Exploitation de données pour l'optimisation des trajectoires aériennes

Avec Cédric Rommel, doctorant Inria/École polytechnique chez Safety Line, le *big data* s'invite dans l'aviation et vient au secours de l'environnement. En exploitant l'incroyable quantité de données enregistrées par les boîtes noires au cours des vols, on peut concevoir des trajectoires réduisant la consommation de carburant et les émissions de CO_2.

Institut Henri Poincaré

FSMP Fondation Sciences Mathématiques de Paris

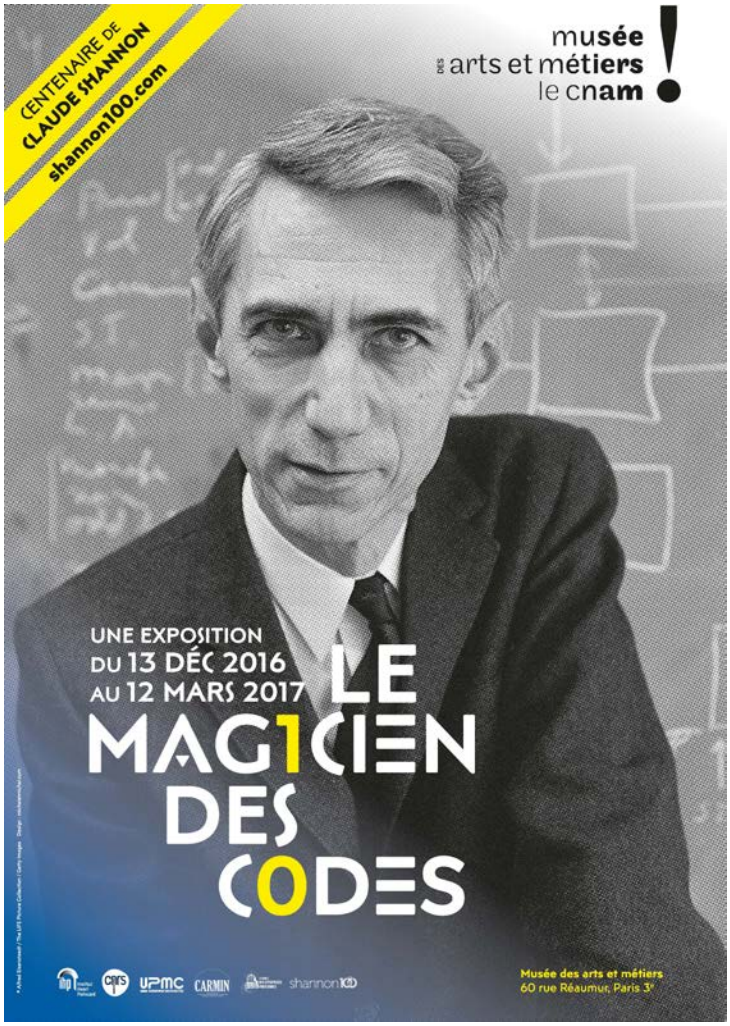
aMies Les maths vecteur d'innovation

Ces cinq posters seront exposés à la Bibliothèque de l'IHP (11 rue Pierre-et-Marie-Curie, Paris 5e) du 10 novembre au 16 décembre 2016. Retrouvez-les également sur le site de la FSMP : www.sciencesmaths-paris.fr rubrique Documentation/Espace Grand Public.

Une exposition, un cycle de rencontres et un concours

en 2016 et 2017 à l'Institut Henri Poincaré de Paris

L'Institut Henri Poincaré (IHP), accompagné de ses partenaires académiques et industriels, participe à la commémoration du centenaire Claude Shannon, en organisant en 2016 et en 2017 une exposition, un cycle de rencontres grand public et un concours à destination des lycéens, sous le label Shannon100. Pour en savoir plus : shannon100.com



L'exposition « Le magicien des codes »

L'exposition *Le magicien des codes* se tiendra du 13 décembre 2016 au 12 mars 2017, sur environ 150 m², au musée des Arts et métiers. *Le magicien des codes* sera conçue pour être itinérante et mise à disposition des structures souhaitant l'accueillir.

Envoyer un email, publier un message sur Facebook, téléphoner à l'autre bout du monde, regarder la télévision, rien de plus simple ! Mais comment ça marche ? Comment être sûr de transmettre ou de recevoir le bon message ? Qu'il n'arrive pas dans trois jours ? Qu'il ne soit pas piraté ? Ces gestes simples en apparence s'appuient sur la numérisation et la compression de nos messages, leur transmission sur des fibres optiques, des réseaux mobiles, des réseaux wifi, autant de domaines sur lesquels travaillent des équipes entières de chercheurs.

Claude Shannon a été l'un des premiers scientifiques à étudier le traitement de l'information. Soixante-dix ans plus tard, les découvertes de ce personnage original, farceur et joueur influencent toujours les technologies qui nous entourent. Cette exposition retrace la manière dont ses recherches ont bouleversé l'histoire des sciences de l'information et de la communication.

Un cycle de rencontres

En complément de l'exposition, une dizaine de rencontres sont programmées entre octobre 2016 et mars 2017. Ces conférences s'adressent à des publics variés, initiés aux sciences ou non. Elles traitent aussi bien de sujets techniques, relatifs à la théorie de l'information que des aspects historiques en rapport avec Claude Shannon. Ces conférences sont organisées en partenariat avec différentes institutions parisiennes et s'insèrent au cœur de leur programmation :

- À l'Espace des sciences Pierre-Gilles de Gennes le 7 novembre avec Dinh Thuy Phan Huy et Julien de Rosny.
- Au Bar des sciences le 14 décembre avec Jean-Louis Dessalles et Milad Doueihi.
- Au palais de la Découverte les samedis 14, 21 et 28 janvier avec Josselin Garnier, Merouane Debbah et Bruno Martin.
- Au musée des Arts et métiers le 12 janvier 2017 avec Jon Gertner et Cédric Villani et le 9 février avec Erwan Le Pennec.
- À l'Institut Henri Poincaré le 9 mars avec Michael Tanner et Mathias Fink.

Un concours à destination des lycéens : « Les trophées Shannon »

Les Trophées Shannon récompenseront des initiatives pédagogiques autour des sciences et des technologies du numérique à destination des jeunes, sous forme d'un concours qui s'adressera aux établissements et enseignants du secondaire ainsi qu'aux associations dans toute la France.

Les Trophées Shannon seront dotés de trois prix pour des initiatives, individuelles ou collectives, d'un enseignant avec sa ou ses classes, d'un établissement ou d'une association pour un projet éducatif collectif. Les critères de sélection des projets seront l'approche pédagogique, scientifique et culturelle mise en œuvre.

COMMUNIQUÉ

Des Laboratoires d'EXcellence

Les mathématiques disposent sur l'ensemble du territoire d'un important réseau de structures les reliant aux entreprises et à la société. Leurs actions sont nationales et internationales. Parmi celles-ci, les Labex préfigurent les nouvelles passerelles entre recherche, formation et monde économique, telles que voulues par les Investissements d'Avenir. Deux nouveaux exemples pour mieux comprendre l'importance de ces laboratoires.

Le LabEx LMH

Quand, de Paris, on s'aventure vers le sud, on passe au large du plateau de Saclay. Bien que la dénomination évoque des immensités désertiques, le périmètre de Paris-Saclay compte plus de 400 mathématiciens permanents, rassemblés au sein de la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (FMJH) et du LabEx Mathématique Hadamard.

Attirer des talents

Le plateau de Saclay est en chantier, une ville est en construction, autour d'un nouveau type d'université. À la pointe de ce mouvement, la FMJH a bâti une unique mention de master et une unique école doctorale de mathématiques, à partir de la nuée de formations dispersées dans 18 établissements. Ce regroupement facilite le recrutement d'étudiants à l'étranger. Ces derniers bénéficient d'un système de bourses auquel la FMJH et son LabEx LMH consacrent la quasi-totalité de leurs ressources, et d'un accueil personnalisé. Les réseaux internationaux (Brésil, Chine), en facilitant les déplacements de chercheurs, renforcent les collaborations et consolident les flux d'étudiants venus des pays émergents.

Irriguer les entreprises

L'insertion professionnelle des étudiants, notamment dans le privé, est au cœur des préoccupations. Aux côtés de nombreux partenaires, la FMJH s'investit dans le Forum de l'Emploi Mathématique, le 15 décembre.

La même intention anime la FMJH dans ses relations avec les entreprises. Le Programme Gaspard Monge pour l'Optimisation et la Recherche Opérationnelle (PGMO) est un dispositif de mécénat orienté proposé aux entreprises. Il est né en 2012 à l'initiative d'EDF. Il a un caractère novateur : en acceptant de rendre publics des problèmes mathématiques identifiés par ses équipes de recherche comme des verrous, et avec un apport financier, EDF a pu féconder une vaste communauté académique internationale et la rapprocher de ses préoccupations, dans un climat d'ouverture et d'échange. C'est pourquoi le jury du prix AEF 2016 des meilleures initiatives partagées universités-entreprises a décerné au PGMO le prix de la catégorie recherche-innovation. En s'élargissant à la science des données, il s'ouvre aujourd'hui à d'autres entreprises, qui seront autant de portes d'entrée vers des carrières dans le privé pour les étudiants de Paris-Saclay.

Le LabEx AMIES

AMIES est le trait d'union entre les entreprises et les mathématiciens. L'Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société est une structure nationale, portée par le CNRS en partenariat avec Inria et UGA (l'université Grenoble-Alpes).

Sa mission principale est d'inviter les entreprises françaises et les mathématiciens à travailler ensemble, au travers d'initiatives incitatrices *(voir ci-dessous)*.

Un réseau national

AMIES est aussi un Labex d'exception, n'étant pas un laboratoire, mais le réseau des laboratoires de recherche publique en maths. AMIES incite les entreprises à mieux utiliser les mathématiques, qui sont devenues une technologie clé pour la croissance.

Avec un vivier de plus de 6 000 mathématiciens, les entreprises françaises disposent d'une ressource inédite pour booster leur innovation. Les compétences proposées embrassent de nombreux thèmes stratégiques pour l'industrie : *big data*, modélisation, optimisation, traitement du signal et des images, etc.

Les programmes de collaboration mis en place par AMIES sont à la fois souples et rapides. Un appel à projet permanent nous a permis de financer plus de cent projets depuis 2011.

Des initiatives incitatrices

- Les PEPS sont des projets exploratoires financés en partie par AMIES, à l'initiative d'entreprises ayant un problème à résoudre où les maths ont un rôle à jouer.
- Les SEME sont des semaines d'étude organisées par AMIES : des problèmes industriels sont présentés le lundi, expertisés par des groupes de doctorants (en thèse de maths), avec une restitution le vendredi de la même semaine. Il est demandé aux doctorants d'explorer des stratégies de réponse inédites pour l'industriel.
- Les Forums Emploi-Maths, offrent un lieu annuel d'échange entre entreprises, étudiants et centres universitaires de formation

Des résultats qui indiquent la voie

Depuis la création d'AMIES, plus de 70 PEPS ont été alloués, la 19e SEME se déroulera fin janvier 2017 à Lyon. Ce sont plus de 200 entreprises et 400 étudiants qui ont ainsi bénéficié directement de ces initiatives.

LOGIQUE & CALCUL

Formes et ensembles autopavables

Un miracle géométrique : avec des copies de chaque forme d'un ensemble autopavable, on reconstitue chacune des formes en plus grand.

Jean-Paul DELAHAYE

En mai 1963, Martin Gardner présentait dans le magazine Scientific American les figures autopavables (*rep-tiles* en anglais) : des formes géométriques F qui se découpent en plusieurs morceaux, chacun identique à F en plus petit ; ou, ce qui revient au même, des formes géométriques qui, quand on en assemble plusieurs copies, reconstituent la forme initiale en plus grand *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Une question a intéressé les amateurs de géométrie combinatoire : quels polyominos (des réunions de carrés de même taille collés côté contre côté) sont de telles figures autopavables ? Pour prouver qu'un polyomino est autopavable, il suffit de réussir à paver un rectangle avec le polyomino. En effet, si on pave un rectangle, on pave aussi un carré car les longueurs des côtés du rectangle sont des multiples entiers de la longueur du carré de base (la longueur du côté du plus petit carré faisable ainsi avec un rectangle de côtés *a* et *b* est le plus petit commun multiple de *a* et *b*), et donc on reconstitue avec plusieurs de ces carrés le polyomino lui-même en plus grand.

Quelques exemples tirés du merveilleux livre *Polyominoes : Puzzles, Patterns, Problems and Packings* de Solomon Golomb *(voir la bibliographie)* sont indiqués dans l'encadré page 78. Le dernier d'entre eux utilise 50 exemplaires du polyomino pour remplir le rectangle ; il a été découvert en 1990 par William Marshall, de Dunedin en Nouvelle-Zélande.

Le plus petit entier *n* tel que *n* copies du polyomino donnent un rectangle est l'« ordre » du polyomino. L'encadré page 79 indique la liste complète des polyominos avec leur ordre quand le polyomino est composé de 3, 4, 5 ou 6 carrés (on trouvera une liste plus complète avec les rectangles pavés sur http://www2.stetson.edu/~efriedma/order/).

Chaque élément du tableau de cet encadré est un petit puzzle : lorsque le *n* indiqué à côté du polyomino est petit, trouver le pavage du rectangle est aisé ; le puzzle est facile. Lorsque *n* est grand, le puzzle devient difficile. Nous avons donné la solution extraordinaire, découverte par Tom Marlow en 1985, pour le dernier polyomino représenté, car la disposition des 92 pièces composant un rectangle est quasiment impossible à trouver à la main.

Généralisation des formes autopavables

Lee Sallows, dont nous avons déjà présenté les carrés géomagiques (« Les carrés magiques géométriques », *Pour la Science* de juin 2013) est un ingénieur informaticien britannique. Il a conçu une généralisation des formes autopavables et a mené sur ce sujet de mathématiques récréatives une double étude publiée en 2012 et 2014. Il a d'une part utilisé la force brute de l'ordinateur pour découvrir des exemples remarquables de formes satisfaisant sa délicate définition ; d'autre part, il a conçu une méthode mathématique produisant des constructions que l'ordinateur était incapable de lui fournir.

Lee Sallows définit les « ensembles autopavables » (en anglais *self-tiling tile sets* qui donne l'abrégé *setiset*) comme des ensembles E de plusieurs formes plaines F tels que chaque forme F de l'ensemble E s'obtient en plus grand par un assemblage n'utilisant chaque forme de E qu'une fois exactement *(pour un exemple, voir l'encadré page 80, en haut)*.

En fait, la définition que donne Lee Sallows avait déjà été envisagée, sans la nommer, par le mathématicien écossais Charles Dudley Langford dans les années 1950. Ce dernier avait cherché, sans en trouver, de telles combinaisons géométriques. Dans sa rubrique de *Scientific American*, Martin Gardner avait soumis la question à ses lecteurs. Dans son livre *Mathematical Magic Show* publié en 1977, Gardner indique trois solutions.

Lee Sallows exige dans sa définition que le rapport de taille des formes en petit et des formes en grand obtenues par composition soit le même pour chaque forme de l'ensemble autopavable. Il s'ensuit que toutes les formes d'un ensemble autopavable ont la même aire.

La définition n'impose pas aux formes d'un ensemble autopavable E d'être toutes différentes. Lorsqu'elles sont identiques, on

etombe sur la définition des formes auto-
pavables ; lorsqu'elles sont différentes, on
parle d'ensemble autopavable régulier. Les
exemples proposés sont tous réguliers.
Lorsque les côtés des formes sont des mul-
iples entiers d'une même longueur (c'est
e cas des polyominos) et qu'il y a n formes
dans l'ensemble autopavable E, l'aire des
grandes formes est n fois celle des petites ;
par conséquent, le facteur d'agrandissement
entre les petites et les grandes formes, qui
est $\sqrt{n}$, doit être un entier. Il en résulte qu'il
existe des ensembles autopavables com-
posés de n formes seulement si n est un
nombre carré tel que 4, 9, 16, etc.

Comme les formes autopavables, les
ensembles autopavables engendrent des
pavages complets du plan. Pour ce faire, on
part d'une des formes de l'ensemble, dont
es éléments seront dits de niveau 0. On
'entoure par d'autres formes de niveau 0
pour obtenir une forme plus grande, dite de
niveau 1. On entoure celle-ci par d'autres
de niveau 1 pour en obtenir une plus grande
encore, dite de niveau 2 ; ces formes de
niveau 1 se découpent en formes de niveau 0
et donc tout se ramène à un pavage d'une
plus grande surface par des pièces de ni-
veau 0. Puis on recommence et, petit à petit,
on recouvre ainsi des parties de plus en plus
grandes du plan par un pavage n'utilisant
que des formes de niveau 0. À l'infini, on a
recouvert le plan uniquement par des formes
de niveau 0. Les pavages obtenus ainsi sont
e plus souvent non périodiques, mais les
mêmes formes pavent aussi périodiquement
e plan lorsqu'on s'y prend autrement.

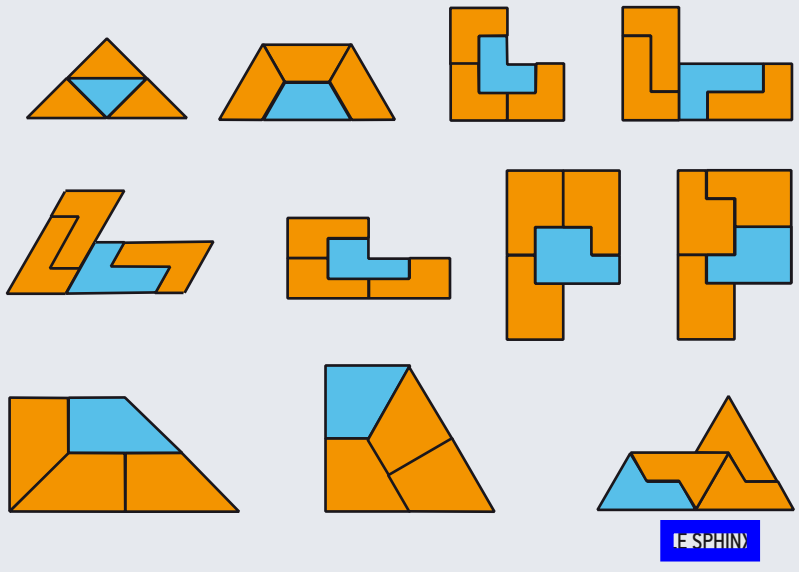
Trouvailles de l'ordinateur

Lee Sallows a mené une série de recherches
systématiques par ordinateur pour trouver
des ensembles autopavables. Il s'est concen-
ré sur les polyominos en n'envisageant que
des polyominos de taille raisonnable (6, 7
ou 8 carrés) et en ne recherchant que des
ensembles autopavables de 4 polyominos.
Si l'on envisage des recherches au-delà de
ces limites, on est confronté à une explosion
combinatoire qu'on ne pourrait éventuel-
ement maîtriser qu'avec de gros moyens
nformatiques.

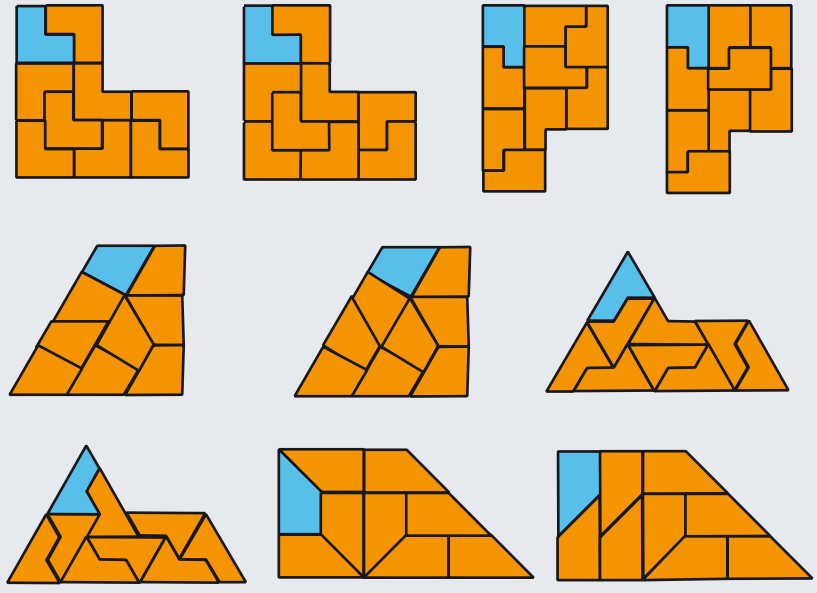
Formes autopavables

En prenant plusieurs copies d'une forme autopavable, on la reconstitue en plus grand, ou, ce qui revient au même : une forme autopavable se découpe en plusieurs morceaux identiques à elle-même et plus petits.

Les exemples donnés sont des formes autopavables par 4 copies *(en haut)* et des formes autopavables par 9 copies *(en bas)*. On voit que certaines de ces formes sont autopavables de plusieurs façons différentes. *(La symétrie miroir est autorisée.)*



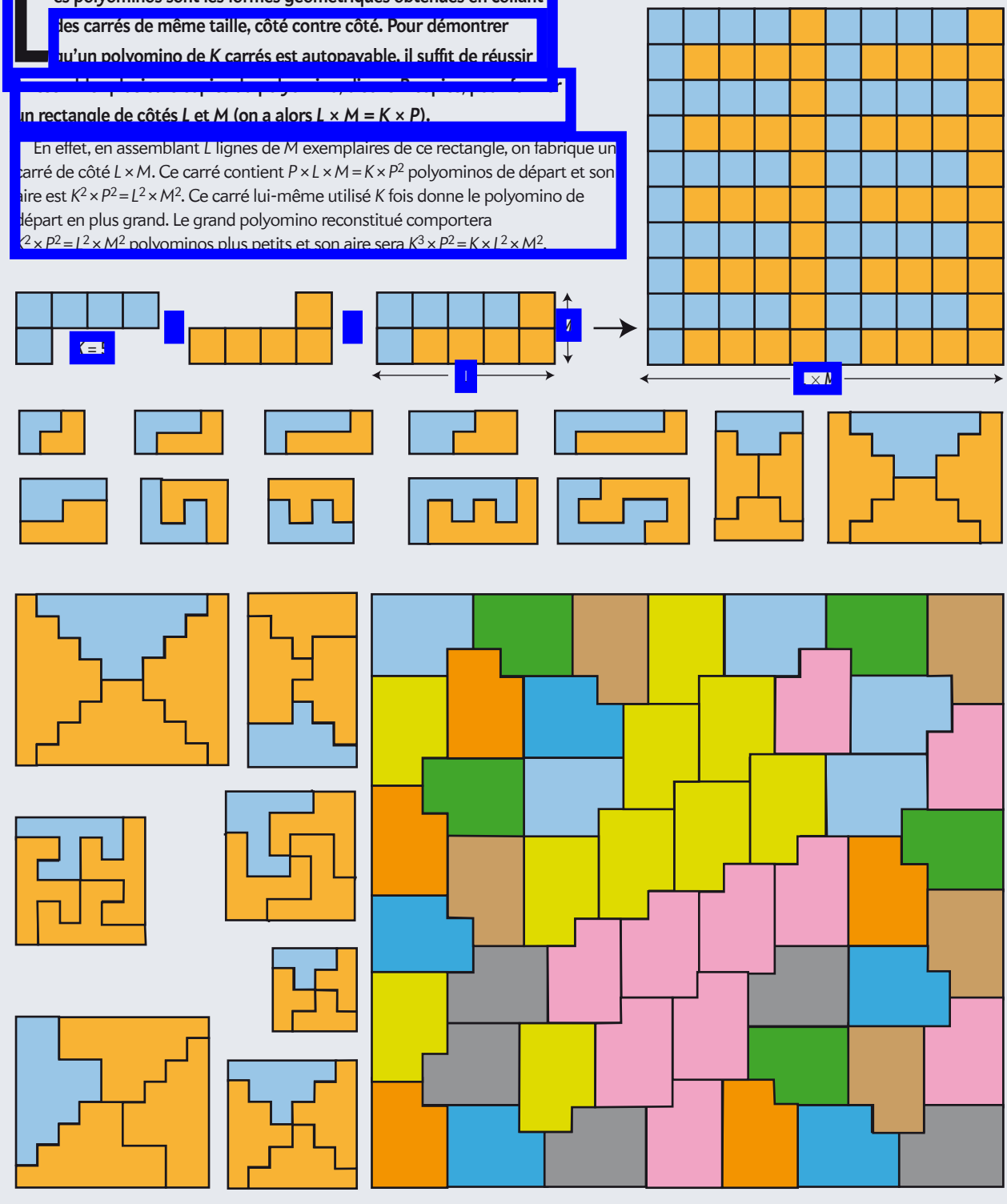
LE SPHINX



Polyominos

Les polyominos sont les formes géométriques obtenues en collant des carrés de même taille, côté contre côté. Pour démontrer qu'un polyomino de K carrés est autopavable, il suffit de réussir un rectangle de côtés L et M (on a alors $L \times M = K \times P$).

En effet, en assemblant L lignes de M exemplaires de ce rectangle, on fabrique un carré de côté $L \times M$. Ce carré contient $P \times L \times M = K \times P^2$ polyominos de départ et son aire est $K^2 \times P^2 = L^2 \times M^2$. Ce carré lui-même utilisé K fois donne le polyomino de départ en plus grand. Le grand polyomino reconstitué comportera $K^2 \times P^2 = L^2 \times M^2$ polyominos plus petits et son aire sera $K^3 \times P^2 = K \times L^2 \times M^2$.



Entre autres découvertes, Lee Sallows a ainsi montré qu'il existe 7 ensembles autopavables réguliers, composés chacun de 4 octominos *(voir l'encadré page 80, en bas)*. Les cinq ensembles dessinés en étoiles ont l'extraordinaire propriété que chacun peut paver non seulement ses propres octominos, mais aussi tous les octominos des autres. Une flèche liant deux quadruplets d'octominos A et B signifie que les octominos de A pavent, en les utilisant chacun une fois exactement, les octominos de B.

La complexité combinatoire du problème ne doit pas être sous-estimée : il est vraiment difficile pour un ordinateur d'explorer toutes les combinaisons possibles, même dans le cas des quadruplets d'octominos, et il semblait quasiment impossible d'envisager des ensembles autopavables comportant 9 polyominos. C'était sans compter sur la détermination et le subtil esprit géométrique de Lee Sallows. Menant un raisonnement que nous allons détailler, il a réussi à concevoir une puissante et astucieuse méthode de création d'ensembles autopavables qui a produit de nombreuses configurations hors de portée de l'ordinateur.

Une simple astuce ?

La méthode est fondée sur les formes autopavables simples, les *rep-tiles* dont parlait l'article de Martin Gardner de 1963. Pour qui ouvre les yeux, ces formes recèlent les composants des nouvelles constructions.

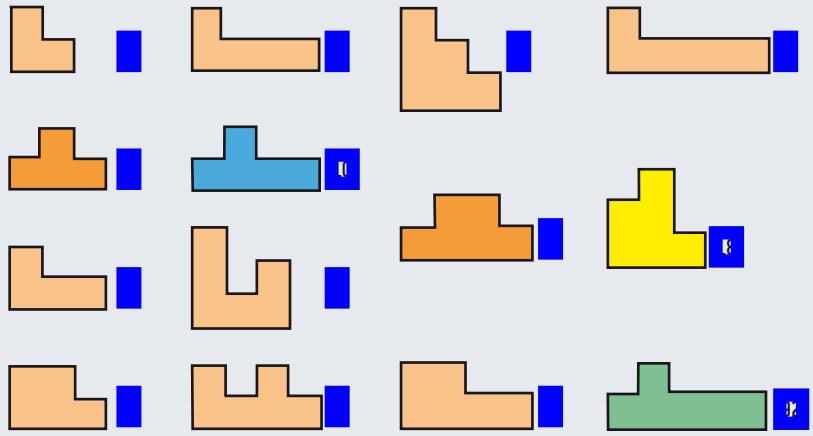
– On part donc d'une figure unique autopavable. Prenons l'exemple du sphinx montré dans l'encadré page 77.

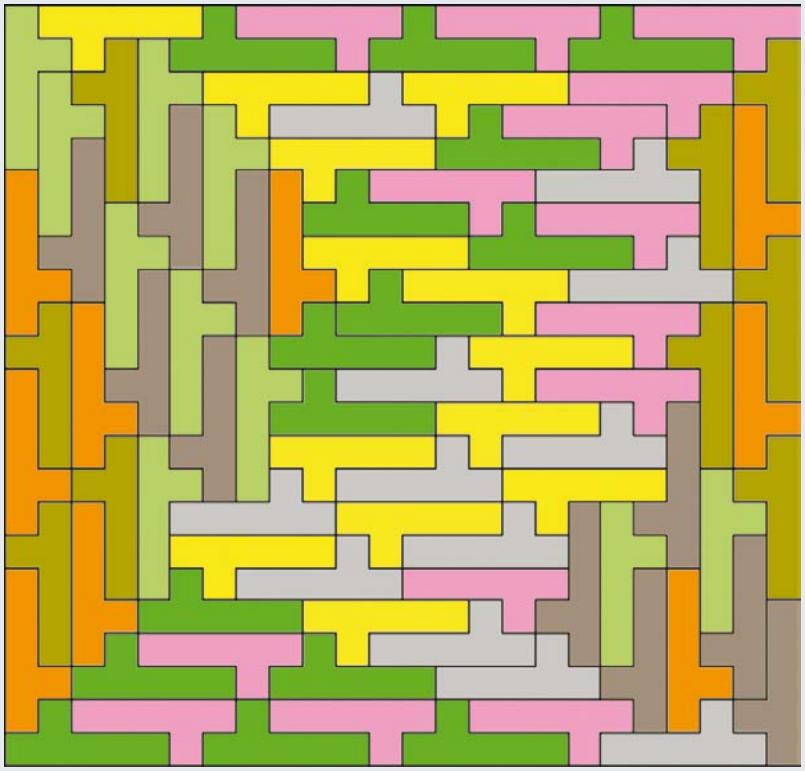
– On regroupe dans le découpage les petites formes de sphinx deux par deux, ce qui donne trois schémas différents et six formes nouvelles A, B, C, D, E et F, dont deux ne sont pas d'un seul tenant, D et F *(voir l'encadré page 82, en haut)*.

– Par construction, en ne considérant que les pièces A, B, C et D, on peut paver deux grands sphinx. Mais ces deux grands sphinx, une fois correctement repositionnés, sont exactement ce qu'il faut pour reconstituer A, B, C et D en grand puisque, justement, A, B, C et D sont chacun la réunion de deux

De petits puzzles

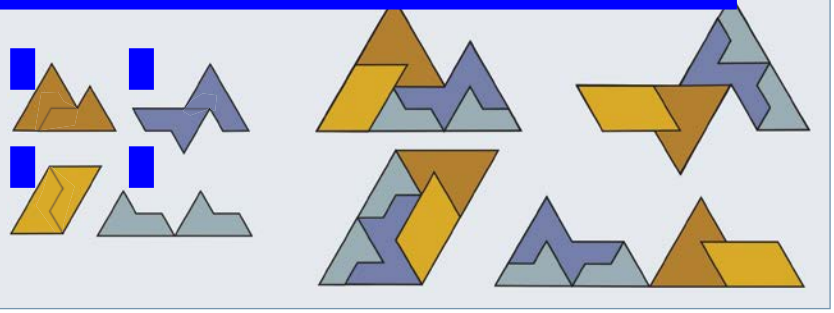
À côté de chaque polyomino (non rectangulaire) comportant 3, 4, 5 ou 6 carrés de base et pouvant paver un rectangle, on a indiqué combien d'exemplaires au minimum il fallait pour obtenir un rectangle. C'est un jeu de trouver l'assemblage solution. Pour le dernier polyomino, la difficile construction est dessinée. Si vous ne trouvez pas les solutions, voir : http://www2.stetson.edu/~efriedma/order/





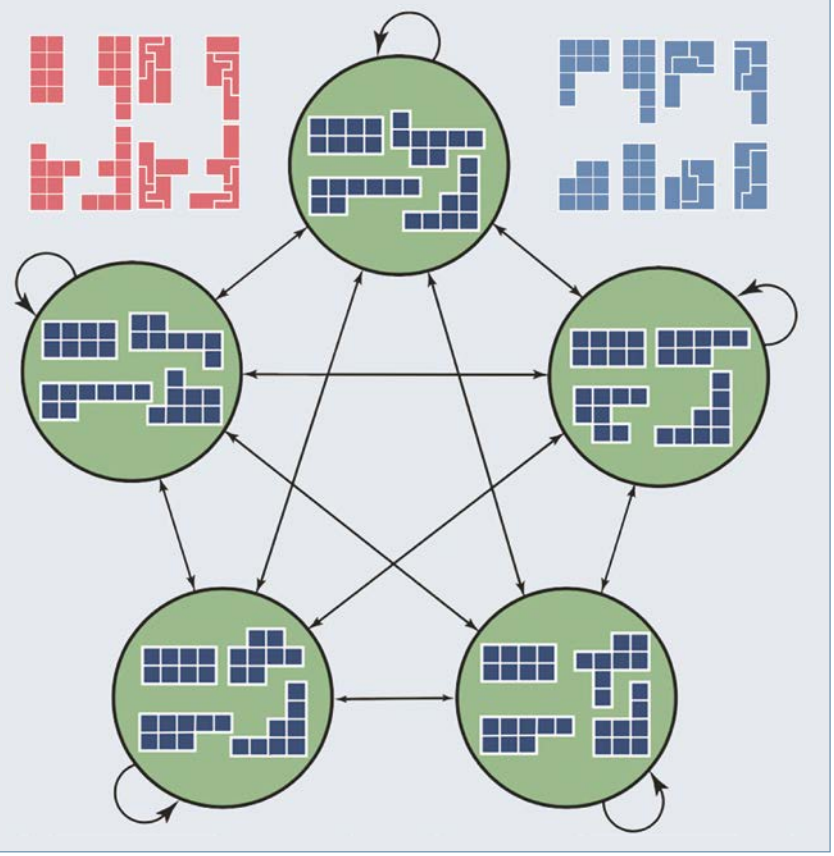
Un ensemble autopavable

En prenant un exemplaire de chaque forme d'un ensemble autopavable E (ici à 4 formes), on reconstitue en plus grand chacune des formes de E (la forme 4 est en 2 morceaux se touchant juste par un point, ce que l'on autorise).



Sept ensembles autopavables de 4 octominos

En menant une recherche exhaustive par ordinateur, Lee Sallows a trouvé qu'il existait exactement 7 ensembles autopavables réguliers (sans répétition) de 4 octominos, un rouge, un bleu et 5 qui forment une étoile remarquable car



L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

T. Tao, **The Erdős discrepancy problem**, 2015 : http://arxiv.org/pdf/1509.05363.pdf

L. Sallows, **More on self-tiling tile sets**, *Mathematics Magazine*, vol. 87(2), pp. 100-112, 2014.

J.-P. Delahaye, **Les carrés magiques géométriques**, *Pour la Science*, n° 428, juin 2013.

L. Sallows, **On self-tiling tile sets**, *Mathematics Magazine*, vol. 85(5), pp. 323-333, 2012.

S. W. Golomb, **Polyominoes : Puzzles, Patterns, Problems and Packings**, Princeton University Press (2e édition), 1996.

M. Gardner, **Mathematical magic show : More puzzles, games, diversions, illusions & other mathematical sleight-of-mind from Scientific American**, Random House Inc., 1977.

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

Palais découverte

les conférences

u Palais de la découverte

ntrée bre dans la mite des places disponible

ONFERENCE

Climat : quels enjeux après l'Accord de Paris ?

Samedi 3 décembre à 17h

Avec **Valérie Masson-Delmotte**, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA), à l'occasion de la remise de son Prix Jean Perrin 2015, décerné par la Société française de physique.

programme complet sur palais-decouverte.fr

n partenariat avec

vec le soutien d

SCIENCE culture plus

Cité des sciences & de l'industrie

les conférences

la Cité des sciences et de l'industrie

ntrée dans la mite des places disponible

Cérémonie de clôture du 10e festiva

Les chercheurs font leur cinéma

Samedi 26 novembre à 14h30

Embarquez au cœur de la science ! De jeunes chercheurs vous font découvrir leur sujet de recherche au moyen de courts métrages de cinq minutes.

→ Projection des films, débat avec les réalisateurs, vote et remise des prix du public, des lycéens et du jury.

cite-sciences.fr

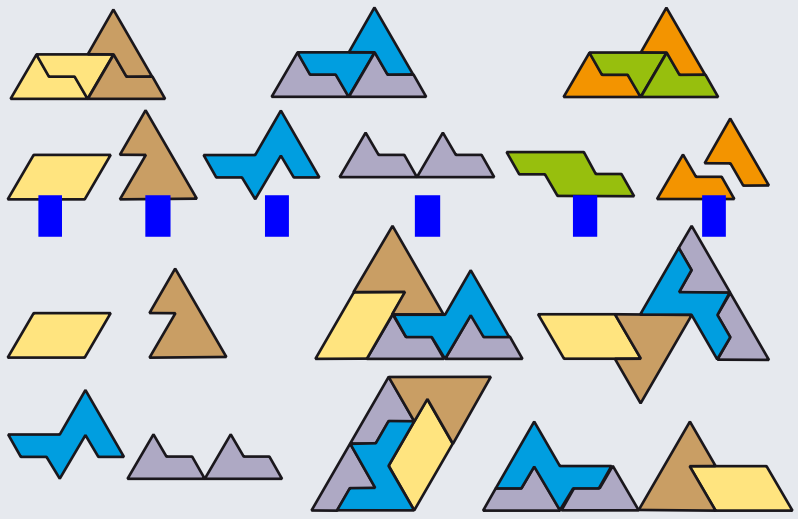
n partenariat avec

vec le soutien d

SCIENCE culture plus

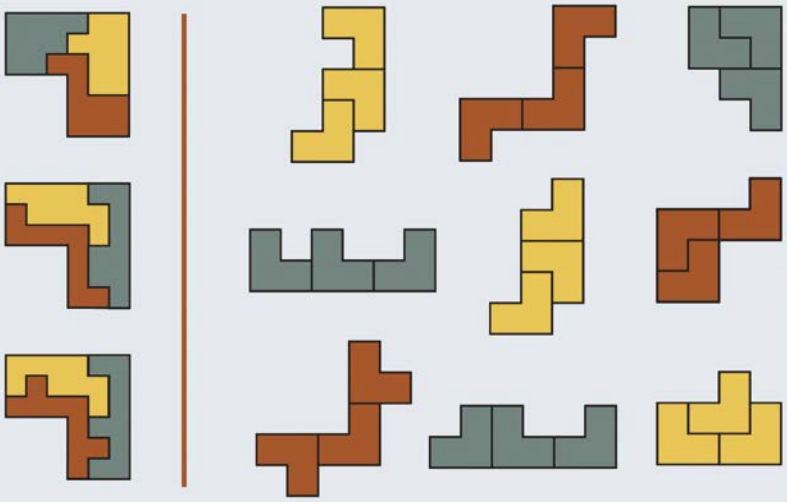
Construction à la main

Partant du sphinx qui se découpe en 4 sphinx, Lee Sallows regroupe les petits sphinx deux par deux de 3 façons différentes, obtenant 6 formes qui sont donc des « doubles sphinx ». Par construction, ces doubles sphinx peuvent [illegible] l'ensemble de 4 formes autopavables illustré dans l'encadré page 80.



Un ensemble autopavable de 9 formes

La méthode de l'encadré ci-dessus se généralise en regroupant non plus 2, mais 3 formes à la fois. Elle a permis à Lee Sallows de découvrir des ensembles autopavables constitués de 9 formes différentes.



sphinx. {A, B, C, D} est donc un ensemble autopavable à quatre éléments.

Le procédé est très efficace même si, dans l'exemple considéré, il ne donne pas quatre pièces d'un seul tenant. Le procédé permet d'obtenir des ensembles autopavables à 9 éléments *(voir l'encadré ci-dessous)*.

Ordinateurs à la peine, humains glorieux

L'ordinateur donne accès à des vérités qu'on ne verrait pas sans lui. Par exemple, on ne connaît pas aujourd'hui de preuve autre que celle de l'ordinateur qu'il n'existe pas d'ensemble autopavable régulier composé de 4 heptominos. Cependant, l'intelligence humaine ouvre souvent des voies qui se révèlent plus belles et fécondes que celles de la machine un peu trop tâcheronne. L'exemple de Lee Sallows est remarquable et remet en mémoire une situation similaire récente.

En 2015, une équipe de l'université de Liverpool démontrait, à l'aide d'un calcul colossal réalisé par ordinateur, l'exactitude de la conjecture de la « discrépance » de Paul Erdős dans le cas $C = 2$. Nous ne la rappelons pas, car c'est un peu compliqué, mais vous la trouverez détaillée sur Wikipedia ou dans l'article *Comment vérifier les longues démonstrations ?* de cette rubrique de juin 2015. La démonstration de l'ordinateur écrite explicitement était la plus longue démonstration mathématique jamais produite sur Terre. L'ordinateur triomphait !

Le mathématicien Terence Tao a cependant démontré quelques mois plus tard, sans ordinateur cette fois, la conjecture de la discrépance. Il ne s'est d'ailleurs pas contenté du cas $C = 2$, mais a traité tous les cas à la fois, ce que les méthodes utilisées par l'ordinateur étaient très loin de pouvoir réaliser. La preuve humaine était plus courte, donc compréhensible par un humain, et plus générale !

L'intelligence artificielle (et la démonstration automatique) réalise des exploits remarquables. Elle fait des progrès réguliers, mais ne jetons pas trop vite l'éponge : l'humain a encore quelques beaux restes ! ■

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

1 AN - 12 Nos
59€
24% d'économie

2 ANS - 24 Nos
110€
29% d'économie

3 ANS - 36 Nos
159€
32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

❑ **OUI**, je m'abonne à *Pour la Science* en formule Découverte

❑ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de ~~78,50€~~ **(D1A59E)**
❑ **2 ans • 24 numéros • 110 €** au lieu de ~~157€~~ **(D2A110E)**
❑ **3 ans • 36 numéros • 159 €** au lieu de ~~235,50€~~ **(D3A159E)**

A470

MES COORDONNÉES

Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal :
Ville :
Tél :
Mail (pour le suivi de votre dossier)

MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire
N°
Date d'expiration
Clé
Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule) @

Grâce à votre email nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*.

SCIENCE & FICTION

Peut-on estimer la biodiversité extraterrestre ?

Pour l'écrivain Arthur C. Clarke, l'Univers héberge de nombreuses vies intelligentes, mais celles-ci le sont bien trop pour venir sur Terre. Si tel est le cas, d'intrépides naturalistes partiront peut-être un jour recenser ces espèces d'un autre monde.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ **Illustration : Marc BOULAY**

Un jour d'été 1950, à la cafétéria du laboratoire américain de Los Alamos, des physiciens plaisantent à propos d'une caricature d'extraterrestres publiée dans le *New Yorker* du 20 mai. Un débat plus sérieux s'ensuit alors sur l'existence ou non des « petits hommes verts », jusqu'à ce qu'un sceptique du nom d'Enrico Fermi lance à ses collègues « Where is everybody ? » (« Où est passé tout le monde ? »). Selon les historiens des sciences, cette question serait à l'origine du fameux « paradoxe de Fermi » stipulant que si des civilisations extraterrestres existent quelque part dans l'Univers, elles seraient déjà entrées en contact avec nous par un moyen ou un autre. Plusieurs scientifiques ont avancé des hypothèses pour résoudre le paradoxe de Fermi. Selon l'une d'elles, l'Univers serait trop jeune pour avoir permis à la vie, intelligente ou non, d'apparaître ailleurs que sur Terre.

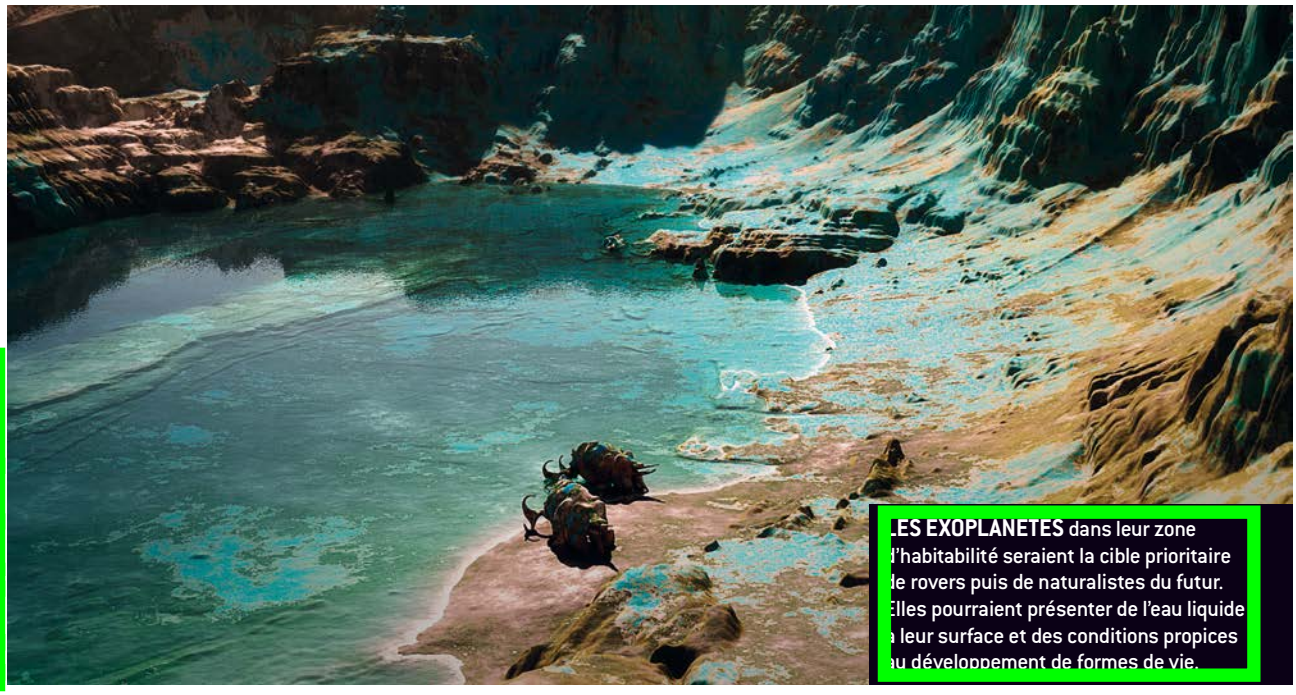
D'autres chercheurs, plus optimistes, préfèrent mettre en avant les découvertes les plus récentes en astrophysique : la multitude d'exoplanètes découvertes et la présence de nombreuses molécules organiques dans des nuages interstellaires géants et d'acides aminés dans les comètes. Pour eux, la question n'est pas de savoir si les extraterrestres existent, mais plutôt comment détecter leur présence.

Afin de quantifier ce grand écart des possibles entre une vie terrienne unique et un Univers où foisonne la vie, l'astronome américain Frank Drake, fondateur du programme SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*), a proposé en 1961 une formulation mathématique devenue célèbre. La « formule de Drake » estime le nombre de civilisations extraterrestres présentes dans la Voie lactée en fonction de différents paramètres allant du taux de formation d'étoiles dans la galaxie à la durée de vie moyenne d'une civilisation. Drake lui-même faisait une estimation de dix civilisations en mesure de communiquer dans la Voie lactée, une valeur qui peut être multipliée ou divisée par plusieurs ordres de grandeurs selon les hypothèses adoptées. Une version modifiée de cette formule a été proposée en 2013 par l'astronome et planétologue canadienne Sara Seager afin d'estimer le nombre de planètes habitables de notre galaxie.

Un autre moyen, plus humoristique, d'estimer le nombre de formes de vie présentes dans l'Univers consiste à se tourner vers la science-fiction ! Imaginons un naturaliste galactique dont la mission serait de recenser un maximum d'espèces extraterrestres en un minimum de temps.

L'album *L'Ambassadeur des Ombres* (en cours d'adaptation par Luc Besson), de la série de bandes dessinées « Valérian et Laureline » de Pierre Christin et Jean-Claude Mézières, donne une telle occasion à notre naturaliste. L'action se déroule sur Point Central, station spatiale géante et labyrinthique, ainsi décrite par les auteurs : « Immense construction artificielle où se multiplient sans cesse les ports d'attache.

DANS LE FILM *STAR TREK : SANS LIMITES*, le spectateur suit les aventures de l'équipage de l'*USS Enterprise* dont la mission principale est, tels des naturalistes galactiques, d'explorer et de découvrir de nouveaux mondes et de nouvelles espèces.



LES EXOPLANETES dans leur zone d'habitabilité seraient la cible prioritaire de rovers puis de naturalistes du futur. Elles pourraient présenter de l'eau liquide à leur surface et des conditions propices au développement de formes de vie.

organisme mosaïque où se résume l'inouïe diversité de l'Univers. » Cette impressionnante station héberge en effet des espèces très variées comme les Rours, sortes de limaces intelligentes mais toxiques, ou les Zools, humanoïdes bleus aux oreilles pointues, chargés de la maintenance. Point Central étant censé regrouper toutes les civilisations présentes dans l'Univers, c'est le lieu idéal pour en faire le recensement. D'ailleurs, au fil des 46 pages de l'album, les auteurs n'illustrent pas moins de 72 espèces différentes (humains compris), représentées par environ 400 individus ; un réel travail encyclopédique.

Dans l'univers *Star Wars*, notre enquêteur se rendrait tout naturellement à la cantina de Mos Eisley, sur la planète Tatooine. Cet établissement peu fréquentable est le lieu de passage obligé de nombreux pilotes, mais aussi de trafiquants, bandits de grands chemins et autres chasseurs de primes venus des quatre coins de la galaxie. Ainsi, tout lieu de rencontre serait propice à cette étude : la taverne interstellaire de Maz Kanata, vieille amie de Yoda installée sur la planète Takodana, ou le très officiel sénat galactique, sur la planète Coruscant. Mais il faut garder à l'esprit que cette concentration d'espèces différentes n'est pas forcément représentative de la diversité locale. Par exemple, les habitants de la planète Naboo, représentés par la reine Amidala, ne sont pas tous des humanoïdes intelligents. Dans les études sur la biodiversité terrienne, le choix du lieu d'investigation est important et oriente les résultats : dans les mers, le nombre de groupes d'espèces est plus grand que dans les environnements terrestres et n'est donc pas représentatif de la biodiversité totale.

La biodiversité terrienne est sans égale

Toujours dans l'univers *Star Wars*, le travail de notre naturaliste est facilité grâce aux diverses bases de données participatives qui recensent et classifient les engins spatiaux, planètes, civilisations, systèmes politiques et les extraterrestres de la saga. C'est le cas de la Wookieepedia, un Wikipédia dédié à cet univers, créé en 2005 par deux fans, Chad Barbry et Steven Greenwood, et qui compte plus de 130 000 entrées. Si ces chiffres donnent le vertige, il convient cependant de les relativiser : étrangement, sur près de 20 millions d'espèces affichées dans toute la galaxie *Star Wars*, les fans n'ont décrit qu'environ 2 000 espèces. C'est très peu si l'on considère les estimations effectuées pour notre seule planète, laquelle hébergerait entre 5 et 10 millions d'espèces actuelles, dont seulement 1 à 2 millions sont déjà connues : la biodiversité starwarsienne n'est donc finalement pas très riche.

Mais estimer la biodiversité, qu'elle soit réelle ou imaginaire, se résume-t-il à compter le nombre d'espèces ? Sa définition le plus souvent admise recommande de prendre aussi en compte la diversité écologique et la diversité génétique. La première permet d'éviter de compter deux fois une même espèce occupant deux environnements différents : c'est le cas de certains amphibiens qui se rencontrent aussi bien dans l'eau (sous forme larvaire) que sur terre (sous forme adulte) et de nombreuses autres espèces (vers, insectes, etc.) présentant un cycle de vie complexe. Pour mesurer la seconde, sur Terre, l'ADN et l'ARN demeurent des éléments de comparaison utiles. Mais qu'en est-il sur les autres planètes où l'information génétique des organismes ne serait pas forcément codée de la même façon ? Les auteurs de la saga *Star Trek* ont pensé à tout : ils ont imaginé un appareil portatif capable notamment de scanner des formes de vie afin de les identifier. Le *tricordeur* remplit à merveille ses fonctions puisque les membres de l'organisation Starfleet ont pour mission d'« explorer de nouveaux mondes étranges, découvrir de nouvelles vies, d'autres civilisations et, au mépris du danger, avancer vers l'inconnu ».

Nul doute qu'Enrico Fermi connaissait les romans et magazines de science-fiction de son époque. Mais s'il avait pu lire « Valérian », voir *Star Wars* ou *Star Trek*, il aurait peut-être été soufflé par l'extrême diversité des extraterrestres imaginés. Aurait-il trouvé leur existence paradoxale ? ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.
M. BOULAY est sculpteur numérique.

La science-fiction passée au crible de la science !

PAR LES CHRONIQUEURS DE LA RUBRIQUE SCIENCE & FICTION DE POUR LA SCIENCE

Un ouvrage idéal pour découvrir les sciences qui gouvernent notre monde... en compagnie de Godzilla, Superman et des extraterrestres !

Belin

nscrivez-vous à la newsletter sciences sur **editions-belin.com**

IDÉES DE PHYSIQUE

La merveilleuse langue du caméléon

Avec sa langue télescopique, le caméléon capture une proie en un clin d'œil. Une prouesse qui tient notamment au stockage d'énergie élastique et au phénomène d'adhésion visqueuse.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Projeter une langue près de deux fois plus longue que sa propre taille en un 1/25e de seconde, saisir fermement une proie qui peut atteindre le tiers de sa propre masse et la ramener dans sa bouche en l'espace d'une demi-seconde : telle est la prouesse du caméléon. Cet exploit n'a pas cessé d'intriguer les chercheurs, qui ont peu à peu compris quels sont les mécanismes physiques mis en œuvre.

Catapulte télescopique

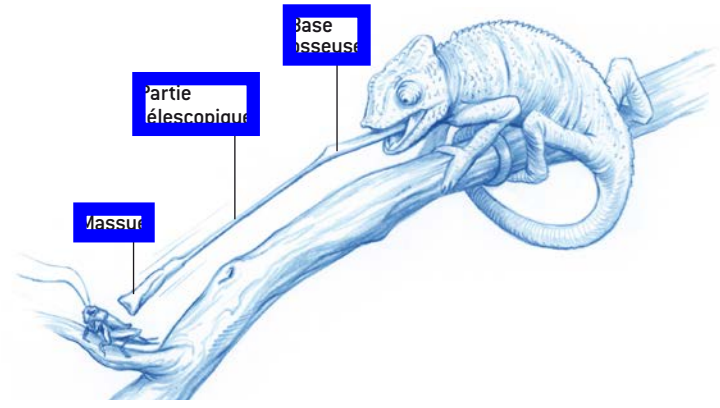
Tout part d'un paradoxe anatomique. Pour atteindre sa vitesse, de l'ordre de 6 mètres par seconde, l'extrémité de la langue du caméléon doit subir une accélération environ 50 fois supérieure à celle de la pesanteur. La puissance requise est de 3 watts par gramme de muscle employé, beaucoup plus que celle déployée par les autres animaux vertébrés. Un mécanisme plus subtil que la simple contraction musculaire est donc nécessaire. En 2004, des chercheurs néerlandais ont suggéré que la langue du caméléon se comporte comme une catapulte, où l'énergie est progressivement stockée avant d'être rapidement libérée.

Première particularité du caméléon, sa langue est constituée de tissus mous qui s'appuient sur une structure osseuse articulée. Avant la projection de la langue, cette structure pivote et fait sortir de la bouche le « processus entoglosse », un os de la taille d'une allumette sur lequel la langue est enfilée comme une chaussette.

La langue elle-même est un organe complexe. Son extrémité comporte une série de gaines emboîtées, en fibres de collagène, et capables de glisser les unes sur les autres pour se déployer de façon télescopique. Ces gaines sont entourées par le muscle accélérateur et rattachées au muscle rétracteur, situé en amont et enfilé lui aussi sur l'os *(voir la figure page 88, en haut)*.

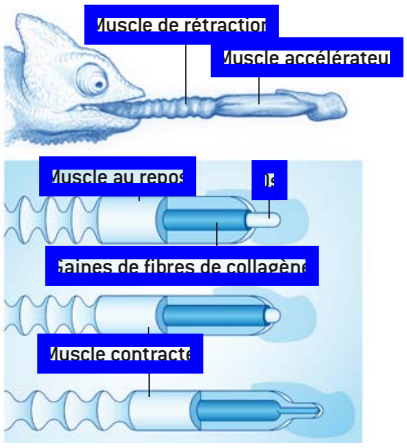
Que se passe-t-il lorsque le muscle accélérateur se comprime autour de l'os ? Comme le muscle rétracteur l'empêche de glisser vers l'arrière, il s'allonge vers l'extrémité de l'os au bout de la langue. Ce faisant, il entraîne avec lui les gaines de fibres de collagène et les met sous tension. Le travail de contraction du muscle est ainsi converti en énergie élastique dans les fibres. Lorsque l'extension longitudinale du muscle atteint le bout effilé de l'entoglosse, les tissus de collagène se mettent à glisser dessus et, en l'absence d'os central, se détendent radialement. Leur énergie élastique est alors convertie en énergie cinétique.

Au niveau de l'extrémité effilée et conique de l'os, cette brutale détente crée une poussée longitudinale, responsable de l'accélération des tissus de la langue. Celle-ci est alors propulsée en avant et l'accordéon du muscle rétracteur, totalement relâché, se déploie complètement. Les



LA LANGUE DU CAMÉLÉON SE PROJETTE À GRANDE VITESSE sur la proie, dont la distance a été préalablement évaluée par le reptile grâce à ses deux yeux orientables indépendamment. Anatomiquement complexe, cette langue comporte une base osseuse, enveloppée par des tissus mous formés notamment de muscles et de gaines télescopiques de collagène.

LA PROJECTION DE LA LANGUE commence par la contraction du muscle accélérateur, qui met en tension les gaines de fibres de collagène entourant l'os. Quand, sous l'effet de la contraction, ce système s'est allongé au point d'atteindre l'extrémité conique de l'os, l'énergie élastique emmagasinée par les gaines de collagène se relâche d'un coup en direction de l'axe central, ce qui pousse fortement les gaines vers l'avant.



accélérations de la langue sont telles que la pesanteur ne joue pas de rôle : la langue s'allonge tout droit, jusqu'à frapper sa cible avant que celle-ci ne s'aperçoive de quoi que ce soit.

Une langue bien gluante

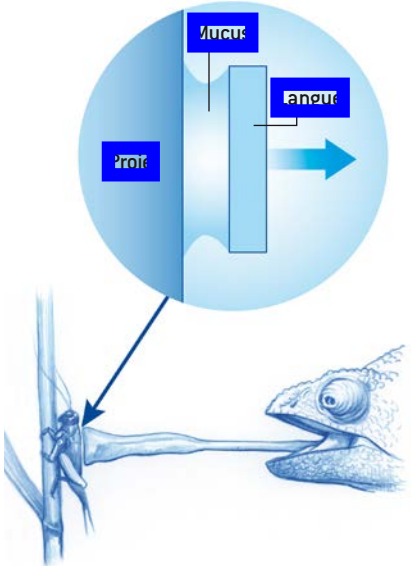
Atteindre la proie n'est pas tout, il faut aussi la ramener vers la bouche. Comment ? Le caméléon doit, avant d'actionner le muscle rétracteur, bien saisir l'insecte avec le bout de sa langue. Lorsque l'axe central, tendu et ferme, de la langue atteint la cible, cette partie cesse immédiatement de progresser tandis que les tissus mous qui l'entourent continuent à avancer et enveloppent en partie la proie. La surface de contact entre cette dernière et la langue est ainsi optimisée.

Mais qu'est ce qui assure la prise ? On invoque différents mécanismes. Le premier relève d'un simple effet velcro. La langue est recouverte de papilles qui lui confèrent de la rugosité : elle épouse ainsi les irrégularités de la surface de la proie et la rétraction de la langue verrouille ces accroches. Le deuxième mécanisme s'apparente plutôt à l'effet ventouse. Lorsque le caméléon propulse sa langue, la massue qui termine celle-ci est convexe, mais on a découvert que pendant le trajet et juste avant l'impact, les muscles du centre de la langue se rétractent, de sorte que la massue devient concave et crée ainsi une dépression.

Pour quantifier la succion qui en résulte, des chercheurs ont étudié en 2000 la force qu'exerçait un caméléon endormi, mais dont la langue était stimulée électriquement, sur une paille de verre, selon que cette dernière était ouverte ou fermée à l'autre extrémité. Ils ont mis en évidence une force nettement plus importante sur la paille fermée, où la pression à l'intérieur peut diminuer comme dans une ventouse, que sur la paille ouverte, à pression atmosphérique.

Ce n'est pas la fin de l'histoire : en 2016, une équipe franco-belge a revu à la hausse la contribution d'un autre mécanisme, l'adhésion visqueuse, dite encore adhésion de Stefan, du nom du physicien slovène qui l'a identifié en 1874.

Imaginons un film d'eau qui baigne l'interstice entre deux plaques que l'on tente de séparer en tirant dessus, par exemple un objet à base plate sur une surface mouillée. Cette séparation va provoquer un écoulement d'eau dans l'espace interstitiel afin qu'il demeure rempli de liquide. L'eau, soumise à de fortes contraintes, acquiert de la vitesse selon l'axe perpendiculaire aux plaques, mais aussi dans le plan qui leur est parallèle. En raison de la viscosité du liquide, c'est-à-dire de la friction entre ses différentes couches en écoulement, une résistance à la traction apparaît. Cette force d'adhésion visqueuse est directement proportionnelle à la viscosité du liquide et à la vitesse de séparation des plaques.



LA SAISIE DE LA PROIE résulte d'un effet de succion exercé par la langue, mais aussi et surtout d'un phénomène d'adhésion visqueuse. La langue est recouverte d'un mucus très visqueux. Lors de son retrait, la traction exercée sur le film de mucus y engendre des écoulements qui, en raison de la viscosité, créent une résistance à la traction, donc une force d'adhésion.

LES AUTEURS

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

Pour en revenir au caméléon, les chercheurs ont d'abord établi que sa salive est très visqueuse : avec une viscosité de 4 poises, elle l'est 400 fois plus que la salive humaine. Étant donné l'épaisseur du film de mucus, de l'ordre de 50 micromètres, et la surface de contact, d'environ 15 millimètres carrés, on obtient des forces de l'ordre de 0,1 newton (soit le poids de 10 grammes) pour des vitesses d'étirement de l'ordre du micromètre par millième de seconde.

Ces forces sont considérables, mais elles diminuent fortement quand le film s'épaissit. Or plus la cible est grosse et sa masse importante, plus la force d'adhésion doit être intense pour la mettre en mouvement, ce qui nécessite des vitesses d'étirement du film plus élevées, tous les autres paramètres demeurant identiques. Mais cela conduit à une augmentation plus rapide de l'épaisseur du film et à une chute brutale de la force d'adhésion avec, *in fine*, un risque de détachement de la proie.

Une étude complète qui tient compte de l'élasticité de la massue de la langue montre qu'il existe une taille limite de proie au-delà de laquelle l'adhésion visqueuse ne permet plus la capture. Cette limite est d'ailleurs supérieure aux tailles des proies habituellement constatées.

En deçà de cette limite, comment s'achève le trajet du repas du caméléon ? Une fois le ressort du bout de la langue détendu, la force d'adhésion s'évanouit d'elle-même, mais la proie a acquis suffisamment de vitesse pour accompagner, grâce à son inertie, le repliement en accordéon de la langue. Elle file alors à vitesse constante jusqu'à la bouche de notre prédateur. Bon appétit !

BIBLIOGRAPHIE

F. Brau *et al.*, **Dynamics of prey prehension by chameleons through viscous adhesion,** *Nature Physics*, vol. 12, pp. 931-935, 2016.

J. H. de Groot et J. L. van Leeuwen, **Evidence for an elastic projection mechanism in the chameleon tongue,** *Proc. R. Soc. Lond. B*, vol. 271, pp. 761-770, 2004.

Retrouvez la rubrique dées de physique sur www.pourlascience.fr

Toutes les archives

Pour la Science
Dossier Pour la Science
1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr

Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

QUESTION AUX EXPERTS

Les sols se renouvellent-ils ?

Sous les forêts, oui, même s'ils s'enfoncent peu à peu. Dans les zones cultivées, non, car l'érosion n'est pas compensée par la matière produite par la décomposition des roches.

Jean-Paul LEGROS

Les montagnes s'aplanissent en quelques centaines de millions d'années. Sous l'effet de l'érosion par les vents, les pluies, etc. ? Pas seulement : en fait, l'usure des reliefs découle surtout d'un phénomène insidieux : l'altération chimique de la couche la plus superficielle des roches. C'est ainsi que se forme le sol, sorte de peau largement minérale, qui joue un rôle essentiel sur Terre. Elle est en effet le support de la végétation qui, directement ou indirectement, est indispensable à la vie animale, donc à la nôtre.

Dans la couche supérieure de la roche mère présente initialement, deux mécanismes principaux conduisent à la formation du sol : d'une part, l'eau des pluies dissout les ions constitutifs de la roche et les évacue (solubilisation) ; d'autre part, les particules solides sont entraînées par la gravité vers les rivières (transport). Dans une coupe du sol, on distingue ainsi des strates superposées sur la roche mère, dont chacune correspond à une étape de la déconstruction de la roche (*voir l'image du haut*).

Dans les régions forestières, l'Amazonie par exemple, on postule que le sol perd autant de matière par solubilisation/transport qu'il en gagne par déconstruction de la roche mère. Le système est alors en équilibre, c'est-à-dire que le sol se reconstitue à sa base aussi vite qu'il s'use à son sommet. Il s'enfonce donc dans le paysage sans changer d'épaisseur.

La limite entre le sol et la roche saine sous-jacente est nommée front d'altération. On a cherché à mesurer la vitesse à laquelle ce front s'abaisse. Toutes sortes de méthodes ont été utilisées pour ce faire : bilans chimiques, datations, mesures géologiques… On obtient des valeurs dont l'ordre de grandeur est de 10 ou 100 mètres par million d'années, c'est-à-dire quelques centimètres par millier d'années. La quantité de matière que le sol doit gagner pour garder une épaisseur constante est donc assez faible.

Que se passe-t-il sur un sol cultivé ? Comme le travail mécanique de la terre renforce l'érosion, le système n'est plus en équilibre. Le sommet du sol descend donc plus vite que sa base. Résultat : le sol s'amincit. Cela explique d'étranges choses.

Des paysans qui cultivaient la roche ?

Ainsi, dans l'Hérault, on trouve les traces de villages néolithiques dans des garrigues où la roche affleure partout, de sorte que la terre de culture est totalement absente. Comment est-ce possible ? Si, il y a plus de 5 000 ans, des paysans se sont installés là, c'est bien qu'ils y ont trouvé des sols fertiles, qui ont disparu ensuite, ce qui a entraîné le départ des populations… Ce phénomène s'est répété de nombreuses fois : des civilisations entières ont périclité après avoir érodé les sols qui les nourrissaient.

Aujourd'hui, même en Europe, l'érosion est préoccupante. On estime les pertes moyennes à 7 tonnes par hectare et par an, tous milieux confondus. En partant d'un sol mesurant 1 mètre d'épaisseur, ce qui représente au plus un stock de 15 000 tonnes de terre par hectare, il faudra seulement un peu plus de 2 100 ans pour que cette précieuse couche d'altération ait entièrement disparu.

Avec nos tracteurs surpuissants et nos engins qui pulvérisent la terre et la diminution des restitutions organiques par suite de la disparition des animaux de trait, l'agriculture moderne protège moins les sols que celle que pratiquaient nos ancêtres avec leurs houes servant à égratigner la surface. On ne peut donc pas continuer sur le rythme actuel, d'autant plus que l'urbanisation et l'artificialisation des surfaces réduisent l'étendue des terres agricoles.

Alors que la population mondiale augmente et que les ressources en sols diminuent, où va-t-on ? Certains imaginent des fermes verticales, sortes d'immeubles à produire de la matière verte sur du béton. Bonne idée, certes, mais il faudra alors beaucoup d'éclairage artificiel. Or seules de grandes surfaces horizontales permettent de récupérer une des rares énergies gratuites : celle du Soleil.

À l'échelle humaine, sinon à l'échelle des temps géologiques, le sol est une réserve non renouvelable. Il faut le protéger. ■

Jean-Paul LEGROS, ancien directeur de recherche à l'Inra, est aussi l'ancien président de l'Association française pour l'étude du sol.

Complétez votre collection !

Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur

www.pourlascience.fr

POUR LA SCIENCE LES ARCHIVES

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un retour en grâce des matières grasses

Le délicieux gras saturé a été injustement déconsidéré

Hervé THIS

Dans une casserole, on met du beurre, du lard fumé, et l'on chauffe doucement. Le beurre fond et libère son eau qui, chargée de protéines et de lactose, sédimente au fond de la casserole, laissant surnager une couche de beurre « clarifié ». Simultanément, la matière grasse du lard fond, se mêle à celle du beurre, et les composés odorants apportés par le fumage se répartissent dans cette phase grasse. Une petite écume est éliminée et, après décantation, on récupère une matière grasse un peu fumée, que l'on utilise pour la cuisson des viandes, des poissons et des légumes.

Cette matière grasse saturée est-elle malsaine ? Les composés des aliments sont tous toxiques à des degrés divers. La noix muscade ? Il en faut peu pour nous rendre malade. Les benzopyrènes des fumées ? Cancérogènes. Le méthylchavicol des estragons et basilics ? Cancérogène et tératogène. L'eau ? La neige fondue peut provoquer des chocs osmotiques, son contenu en ions étant inférieur à celui de l'organisme. Tous les composés ont leur danger : varions les aliments et évitons les quantités abusives en assortissant la prise alimentaire d'exercice modéré.

Quant au « beurre au lard fumé » précédent, le fumé et la matière grasse auraient-ils les vertus des huiles d'olive ? Pour ce qui concerne le gras, une révolution est en marche. Les recherches récentes en nutrition réfutent l'hypothèse que les matières grasses, notamment celles dites saturées, sont aussi mauvaises pour la santé qu'on l'a dit.

Les matières grasses sont faites de triglycérides, molécules en formes de peignes à trois dents, le manche étant un résidu de glycérol, et les dents étant des résidus d'acides gras. Dans le beurre, il existe environ quatre cents sortes d'acides gras. Certains sont « saturés », avec des liaisons simples entre les atomes de carbone, et d'autres sont insaturés, avec une (« mono-insaturé ») ou plusieurs (« poly-insaturé ») doubles liaisons.

Les graisses réhabilitées ?

Depuis la promotion des régimes pauvres en graisses, vers la fin des années 1970, l'épidémie d'obésité a augmenté aux États-Unis. On avait incriminé les aliments gras, et notamment ceux contenant des graisses saturées, que l'on a remplacées par des sucres. Les recommandations correspondantes étaient fondées sur des études épidémiologiques des décennies précédentes, notamment l'étude dite des sept pays, qui avait conduit à supposer que l'élévation des taux de cholestérol, d'infarctus et d'attaque cérébrale était due à des régimes riches en graisses, surtout en graisses saturées, et d'autres facteurs.

Toutefois cette étude des sept pays souffrait de divers biais : les pays n'étaient pas choisis au hasard, les données qui contredisaient les idées théoriques n'étaient pas prises en compte et, surtout, corrélation ne signifie pas causalité (les attroupements, dans les gares, ne sont pas la cause de l'arrivée des trains). Et le bannissement des graisses a eu des conséquences malheureuses : comme les aliments pauvres en graisses manquent de goût, l'industrie américaine a augmenté les doses de sucre. Le lait écrémé a remplacé le lait entier, la margarine le beurre, et les féculents se sont imposés devant les viandes et le poisson.

Les matières grasses dont les résidus d'acides gras sont saturés étant rejetées, les fabricants ont utilisé des matières grasses insaturées, moins stables chimiquement ; d'où la pratique des hydrogénations, réactions qui ouvrent des liaisons doubles et ajoutent des atomes d'hydrogène pour plus de stabilité.

Par ailleurs, toutes les matières grasses insaturées ne sont pas également utiles pour notre organisme. Cela semble le cas pour les graisses mono-insaturées, mais les graisses poly-insaturées ont des effets divers, pas toujours bénéfiques.

Finalement, il apparaît que les graisses saturées sont, au pire, neutres pour les maladies cardiovasculaires, et que les régimes riches en graisses sont plus sains que les régimes pauvres en graisses. Grand branle-bas de combat : le gras saturé est de retour. Déjà les grosses compagnies de *fast-food* utilisent le beurre à la place de la margarine dans les biscuits, et l'on va voir revenir le lard et le beurre en... grâce. ■

Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

SANTÉ

PSYCHIATRIE
NEUROCHIRURGIE
NEUROLOGIE
NEUROPHYSIOLOGIE
STÉRÉOTAXIE
NEURO IMAGERIE
STIMULATION CÉRÉBRALE PROFONDE
STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRANNIENE
TOC
TROUBLES AFFECTIFS
NEURO GÉRIATRIE
SOMMEIL
AVC
NEUROPHARMACOLOGIE
PSYCHOPATHOLOGIE

SE FORMER À L'UPMC C'EST CONSTRUIRE ET PENSER ENSEMBLE VOTRE AVENIR

FAÎTES LE CHOIX DE L'EXCELLENCE

UPMC : UNIVERSITÉ DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE

Une offre complète qui s'adapte à vos besoins

- Formations qualifiantes inter entreprises
- Prestations sur mesure, formations intra entreprises
- Parcours individualisés
- Accompagnement à la mise en oeuvre de la VAE individuelle ou collective

BIOLOGIE

MATHÉMATIQUES

INFORMATIQUE

www.fc.upmc.fr

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

afaq ISO 9001 Qualité AFNOR CERTIFICATION

Formation continue
Université Pierre & Marie Curie
«Créateur de futurs»
formation.continue@upmc.fr
01 44 27 82 82

ETHNOBOTANIQUE

Des hommes et des graines

Nathalie Vidal

Delachaux & Niestlé, 2016
(336 pages, 45 euros)

À travers l'espace et le temps, des tropiques aux déserts, des pays exotiques au monde familier, l'auteure dresse un riche panorama des multiples graines utilisées par les sociétés humaines. Ce voyage ethnographique est sous-tendu par de solides connaissances botaniques.

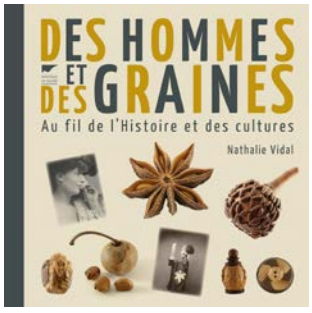
Les graines proviennent d'abord des graminées et des légumineuses, mais aussi d'autres plantes à fleurs, du fruit voire du noyau de certains arbres, bien connus tel l'olivier, ou plus étranges tels l'arganier ou le cocotier. Des graines issues de nos potagers côtoient graine buffle, noix de jésuite ou graine rouge du cardinalier, aperçues au fil des pages.

Qui pense graines pense d'abord nourriture et c'est là leur premier usage : céréales, pois, haricots, maïs sont la base de l'alimentation de nombreuses communautés, tandis que l'orge, le cacao, le café leur fournissent des boissons. Les huiles, d'usage culinaire, sont aussi à la base du savon. Les épices agrémentent les plats, mais sont aussi employées en parfumerie ou en médecine, voire comme poisons. D'autres graines fournissent des pigments colorants. Elles concernent aussi bien le divertissement, comme pions de jeux, que l'esprit, de la confection de porte-bonheur à la divination. Certaines servent de médiums pour le sacré, comme les chapelets familiers ou les malas, venus d'Asie, ou sont investies d'une valeur sacrée, tel le dracontomelon, évoquant Bouddha, ou les graines bleues dites œil de Shiva. Enfin, leur artisanat a donné lieu à des parures très élaborées, sans parler des boutons de corozo, désormais remplacés par le plastique, du lin et du coton, qui fournissent linge et vêtements.

Ces diverses facettes, dont on ne donne ici qu'un aperçu, sont abondamment illustrées de photos anciennes, un peu passées, en bistre, la couleur étant réservée aux graines et aux parures.

On reste stupéfait des liens innombrables qui se sont tissés entre hommes et plantes au fil des millénaires. On peut parler d'interaction, tant la découverte puis l'usage des plantes ont modelé un mode de vie qui a conduit à son tour à la naissance de nouvelles variétés. Dans un monde où règne trop souvent la pollution et où le profit entraîne la dévastation des espaces naturels, on se prend à espérer que tant de savoir-faire et de connivence ne se perdront pas.

Nadine Guilhou
Université de Montpellier



HISTOIRE DES SCIENCES

Histoire illustrée de l'informatique

Emmanuel Lazard et Pierre Mounier-Kuhn

EDP Sciences, 2016,
(280 pages, 36 euros)

Cet ouvrage bien documenté et joliment illustré retrace l'histoire de l'informatique de l'Antiquité à nos jours. Les auteurs ont judicieusement remarquer que son développement s'est accompagné d'un

obscurcissement de la technique. Ils se sont donc attelés à ouvrir la boîte noire informatique pour en dévoiler le contenu. On y découvre des machines, beaucoup de machines. Un obstacle majeur tient à la difficulté de donner à voir une partie importante, mais virtuelle, de l'univers informatique. Car comment illustrer un algorithme autrement que par ses manifestations matérielles ?

Si les dimensions humaines ne sont pas absentes, l'ouvrage met d'abord en avant une histoire des machines. On découvre une histoire faite d'innovation continue, mais marquée par des bonds techniques épisodiques qui expliquent la périodisation adoptée par les auteurs. Aux miniordinateurs succède la micro-informatique, qui elle-même fait place aux réseaux numériques. Chaque période est décrite à travers une succession de nœuds datés qu'il convient de relier. Chaque lecteur peut dès lors tisser sa propre toile et découvrir, derrière les machines, une histoire humaine croisant des avancées techniques, des ambitions économiques, des enjeux sociaux et des représentations culturelles.

Nombre d'illustrations de l'ouvrage montrent des femmes et des hommes, ingénieurs, entrepreneurs ou usagers, interagissant avec des machines. Le récit des auteurs suggère que la faiblesse des premières machines a freiné l'informatique à ses débuts. Le développement exponentiel des performances des machines aurait néanmoins renversé la donne. En effet, nos machines seraient si performantes que l'avenir de l'informatique dépendra surtout de notre capacité à en faire (bon) usage. L'humain serait devenu le point faible de l'informatique. Il faut peut-être s'en réjouir.

Amirouche Moktefi
Université de technologie de Tallinn, Estonie

ZOOLOGIE

Atlas des vertébrés

Arthur Escher et Robin Marchant

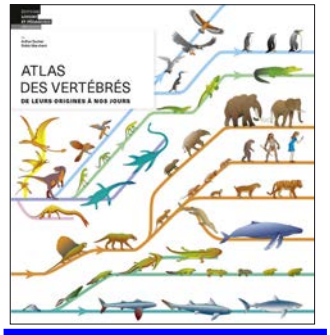
Loisirs et Pédagogie, 2016
(30 pages, 44 euros)

Comme l'a fait remarquer Confucius, « une image vaut mille mots ». Les auteurs ont choisi d'appliquer cette maxime à l'histoire évolutive des vertébrés, ce qui se justifie aisément par le fait qu'il faudrait beaucoup plus de mille mots pour rendre compte de ce long trajet aux innombrables bifurcations, qui s'étend sur plus de 500 millions d'années. Le résultat est un livre très original, qui se compose d'une série de très grandes planches commentées s'étendant sur une double page.

Chacune illustre l'évolution d'un ou plusieurs groupes de vertébrés, en commençant par les poissons et leur sortie de l'eau pour finir avec les ongulés et les cétacés (on notera que les auteurs ont évité tout anthropocentrisme en ne faisant pas de l'homme le « couronnement » de l'évolution). Les arbres phylogénétiques qui

omposent ces planches sont llustrés de petites reconstitutions d'un grand nombre d'animaux qui ont simples mais dans l'ensemble précises – et parfois non dénuées d'humour (voir notamment sous quelle forme est représenté *Homo sapiens*). Une double page consacrée aux principales phases d'extinction complète l'ouvrage ; elle fournit aussi des informations utiles sur les déplacements des continents et les changements climatiques au cours du temps.

Évidemment, les auteurs ont dû procéder à quelques simplifications, car l'évolution des vertébrés est trop buissonnante pour être



représentée dans tous ses détails. Par ailleurs, l'analyse phylogénétique est loin d'être une science exacte, et il a fallu parfois choisir entre plusieurs options, dans les cas où il n'y a pas vraiment de consensus entre spécialistes. Mais dans l'ensemble, le résultat est vraiment remarquable et réservera sans doute quelques surprises aux lecteurs n'ayant pas suivi de près les progrès de la paléontologie.

Les enseignants seront particulièrement sensibles à l'aspect pédagogique de ce joli livre, d'autant plus qu'il est accompagné d'un grand poster récapitulatif, mais quiconque s'intéresse à la paléontologie des vertébrés en appréciera l'originalité et la qualité, tant visuelle que scientifique.

Eric Buffetaut
CNRS-ENS, Paris

BOTANIQUE

Orchidées d'Europe - fleur et pollinisation

J. Claessens et J. Kleynen
Biotope, 2016
(448 pages, 65 euros)

Cet ouvrage est remarquable. D'un type trop rare ! Le travail dont il résulte allie en effet avec brio des compétences rares en botanique, en entomologie et en photographie. Le résultat intéressera les amateurs d'orchidées, les entomologistes ainsi que les botanistes travaillant sur la biologie de la pollinisation. Il ravira aussi tous les admirateurs des beautés de la nature.

Une introduction biologique et morphologique sur les orchidées était nécessaire. Les auteurs ont su expliquer clairement la complexité des structures de ces fleurs, ce qui permet de bien suivre la partie principale de l'ouvrage, titrée « systématique », dans laquelle chaque espèce abordée est décrite. Ils vont bien plus loin : les adaptations morphologiques et biologiques du mode de reproduction et des pollinisateurs sont abordés avec un luxe de détails qui fait plaisir au connaisseur. Le tout est illustré par des photographies somptueuses de la plante et de ses fleurs, ainsi que des insectes pollinisateurs. Tous les genres d'orchidées européennes sont ainsi étudiés en détail.

S'il faut trouver un défaut à cette somme d'informations, il est assez difficile de déterminer où ces orchidées vivent ; ce n'est qu'en début de chaque paragraphe concernant chaque genre que l'on trouve une indication très brève du pays d'où provient le matériel étudié et photographié. Des

cartes de répartition des taxons auraient été les bienvenues. Cette masse d'informations pourrait rebuter le lecteur, mais le texte est facile et agréable à lire. Des annexes techniques très précieuses pour les chercheurs, amateurs ou professionnels, résument les pollinisateurs connus, les taux de fructification, les divers cas d'orchidées autogames, etc. À ne pas négliger, la liste de références est impressionnante et complétée par un index très bien fait.

Pour résumer, cet ouvrage magnifique traite des orchidées d'Europe sous l'angle *a priori* difficile de leur reproduction. Il sera d'une grande utilité aux chercheurs travaillant sur la coévolution des orchidées et de leurs pollinisateurs. Certaines orchidées sont en effet visitées et exploitées par une diversité remarquable d'insectes, ce qui donne à penser que l'idée que l'orchidée induit simplement en erreur le mâle d'abeille pour se faire polliniser est trop simple ! Gageons que ce livre amènera aussi le public à découvrir, photographier et observer les plantes fascinantes que sont les orchidées.

André Nel
MNHN, Paris

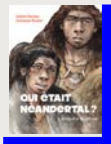
Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

Le Patrimoine
Guy Sallavuard
Fondation du Patrimoine, 2016
(216 pages, 25 euros)

Connaissez-vous la bisquine *La Granvillaise*, la table des connétables de Montmorency, la poule noire du Berry, le musée Rimbaud... ? Partout en France, des femmes et des hommes s'efforcent de restaurer de façon exemplaire des éléments particulièrement archétypaux de notre patrimoine. Ce tour de France donne à lire et à voir plus de cent objets ou bâtiments dont la Fondation du patrimoine a soutenu la restauration. Un livre d'images magnifiques et de textes intéressants.

Histoire universelle de la navigation
François Bellec
De Monza, 2016
(500 pages, 69 euros)

Voici le premier tome d'une somme sur un sujet rarement, sinon jamais, traité aussi bien. Ses 400 illustrations sont toutes d'un intérêt majeur, mais c'est autant pour les textes si bien documentés et si bien écrits par l'auteur – un ancien contre-amiral qui a dirigé le musée national de la marine pendant dix-huit ans et reçu en 2013 le grand prix des sciences de la mer Albert Ier de Monaco. Ce premier tome traite sous les angles variés les systèmes de navigation allant de l'Antiquité à la compagnie des Indes.



Qui était Néandertal ?
A. Balzeau et E. Roudier
Belin, 2016
(96 pages, 19,90 euros)

La science de Néandertal et le savoir-faire de sa restitution graphique traités ensemble : telle est la formule de ce livre efficacement et joliment illustré par le dessinateur Emmanuel Roudier, qui nous fait part au fil des pages des réflexions qu'il a eues lors de la conception des images. S'appuyant sur les résultats scientifiques les plus récents, l'auteur des textes qui accompagnent les images a balayé de nombreux aspects de la biologie et de la culture des Néandertaliens. L'ensemble constitue un livre spectaculaire et concret qui ravira les yeux et nourrira l'esprit.

Collection

À PARTIR DE 7 ANS

Le Soleil et son système, ce qu'on ne sait pas encore...

Anna Alter avec Hubert Reeves, illustré par Benoît Perroud

Voici le dernier opus d'une collection fort originale : le livre en livre, il s'agit d'éveiller la curiosité des enfants, non pas tant sur les savoirs scientifiques que sur les intrigantes questions auxquelles il faut encore trouver des réponses. Pour explorer des sujets tels que le Soleil, la génétique, les origines de l'homme, la matière, etc., la journaliste Anna Alter s'est assuré la complicité de scientifiques : Hubert Reeves, Brigitte Senut, Axel Kahn, Étienne Klein... On découvre avec eux les interrogations actuelles de la science : pourquoi la couronne solaire dépasse-t-elle le million de degrés ? Nos ancêtres mangeaient-ils des fourmis ? À quoi servent nos 98 % de gènes inutiles ? Pourquoi les glaçons solides sont-ils plus légers que l'eau liquide ? « Sur les épaules des savants », une collection qui devrait susciter des vocations !

Le Pommier, 2016 (48 pages, 13,90 euros)

Beau livre

À PARTIR DE 9 ANS

Sur les traces des dinosaures à plumes

Marie-Laure Le Louarn et Arnaud Salomé, illustrations d'Alain Bénéteau

Les oiseaux sont les dinosaures d'aujourd'hui. Voilà l'élément essentiel de culture que cet opus aux magnifiques illustrations scientifiquement fiables (dont certaines à volets) fera acquérir aux jeunes lecteurs. Ces derniers sont nombreux à se passionner pour les dinosaures, qu'ils jettent souvent pêle-mêle dans la catégorie vague des « méchants monstres à grandes dents du passé »... Au-delà de ces traits sensationnels, l'histoire particulière des dinosaures théropodes à plumes est racontée ici de thème en thème (la profondeur du temps géologique, la notion de dinosaure) et de fossile en fossile, tout en n'oubliant pas d'expliquer la démarche des paléontologues. Tout cela en contemplant des animaux qui semblent vivants !

Belin, 2015 (52 pages, 19,95 euros)

À PARTIR DE 12 ANS

La Femme qui prenait son mari pour un chapeau

Fiamma Luzzati

Adèle était une femme très active, épanouie, mère de trois enfants. Au début, elle [illegible] peu à peu, son entourage s'est aperçu qu'elle n'identifiait plus les objets, les personnes qu'elle voyait pourtant bien. Adèle, Victor, Céline et bien d'autres sont atteints de pathologies cérébrales. Au fil de leurs histoires, racontées en bande dessinée sur son blog hébergé par le journal *Le Monde*, Fiamma Luzzati explore les mystères du cerveau. Rassemblées dans cet ouvrage, elles offrent une introduction humaine et accessible aux neurosciences.

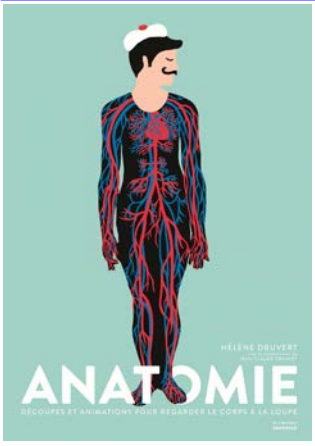
Éditions Delcourt, 2016 (256 pages, 19,99 euros)

À PARTIR DE 8 ANS

Anatomie

Hélène Druvert

On est bien loin ici d'une encyclopédie classique sur l'anatomie humaine. Dans ce magnifique ouvrage animé, Hélène Druvert, illustratrice et designer papier, a transformé la description du corps et de son fonctionnement en une étonnante expédition à la découverte des intérieurs… d'un matelot. Appareils digestif, respiratoire et urinaire, systèmes circulatoires, nerveux et reproducteurs, organes des sens, chaque étape fait l'objet d'une double page où un texte clair et précis accompagne une grande illustration qui, parfois, cache des surprises. Âmes sensibles, ce livre est pour vous !



De La Martinière Jeunesse, 2016 (48 pages, 22 euros)

© Pour la Science - n° 470 - Décembre 2016

À LIRE

Spécial jeunesse

À PARTIR DE 9 ANS

Vikings !

Vincent Carpentier et Jeff Pourquié

Les Vikings fascinent les petits et les grands. Toutefois, les connaît-on vraiment ? Non, [illegible] le mythe l'emporte sur la réalité de ce que furent ces pirates de l'an mille. Archéologue en Normandie, l'auteur des textes brosse ici à grands traits cette civilisation du nord de l'Europe, dont les émissaires guerriers ont joué un rôle historique majeur. Efficacement illustré par les belles images de l'illustrateur Jeff Pourquié, le tableau qui en résulte, fondé en science, énonce des faits tous aussi curieux et intéressants les uns que les autres. On apprend ainsi que les Vikings nous ont légué quelque 150 mots, qu'ils ont laissé des inscriptions runiques partout, construit un rempart traversant tout le sud du pays de Jute tellement ils avaient peur des Francs, qu'ils découvrirent l'Amérique cinq siècles avant Christophe Colomb, qu'ils vendaient des esclaves au milieu de Rouen, et ainsi de suite.

Actes Sud Junior/Inrap, 2016 (80 pages, 14,90 euros).

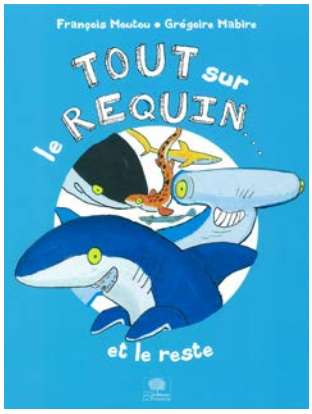
À PARTIR DE 8 ANS

Vrai ou faux ?

Andrea Mil[illegible]

Les éléphants n'oublient jamais ; on attrape un rhume en prenant froid ; une tar[illegible] beurrée ; la tomate est un fruit… Vrai ou faux ? Énoncer de telles questions et y apporter les bonnes réponses est devenu une formule classique dans le domaine de l'édition. Formule classique, mais efficace. Dans cet ouvrage, chaque question fait l'objet d'une double page copieusement illustrée et au contenu morcelé, une autre formule à succès adoptée par nombre d'éditeurs. La double page terminant chaque partie (corps humain, nature, sciences et technologies, espace, Terre, histoire et culture) est consacrée non pas à une question, mais à des informations chiffrées. Un livre où l'enfant ou l'adolescent trouveront sans effort de quoi picorer et s'instruire.

Gallimard Jeunesse, 2016 (192 pages, 19,95 euros).



À PARTIR DE 8 ANS

Tout sur le requin… et le reste

François Moutou et Grégoire Mabire

Le requin a mauvaise presse, pourtant cet animal est mal connu et mal compris. Cet ouvrage est l'occasion de plonger à la découverte du requin, ou plutôt des requins, car on en connaît aujourd'hui près de 500 espèces dont l'aspect et le mode de vie sont très variés. L'auteur, vétérinaire de formation, commence par présenter quelques requins, des plus connus, tel le grand requin blanc, aux plus étonnants, du requin-baleine qui mesure jusqu'à 20 mètres de long jusqu'au requin du Groenland qui peut vivre centenaire. L'ouvrage est riche d'informations que l'on glane au fil des pages. Le dessin sert avec humour le texte, même lorsque ce dernier aborde des sujets aussi sérieux que la pêche, qui menace de disparition certaines espèces de requins. Afin de protéger ces animaux marins, il faut notamment mieux les connaître et les comprendre. Auprès des jeunes, cet ouvrage y contribuera parfaitement.

Le Pommier, 2016 (64 pages, 18 euros).

Marie Curie

Xavier-Laurent Petit

L'École des Loisirs, 2016 (112 pages, 6,80 euros).

On ne se lasse pas de parler aux tout jeunes gens et particulièrement aux jeunes filles de la vie de Marie Curie, qui a su se battre contre l'adversité et les préjugés pour faire triompher son amour des sciences. Cette biographie alerte et bien documentée est une bonne occasion de faire connaître celle qui reste, cent ans après, la seule femme à avoir reçu deux prix Nobel. À partir de 11 ans.

Le Hasard

Ivar Ekeland et Étienne Lécroart

Le Lombard, 2016 (72 pages, 10 euros).

Qu'est-ce que le hasard ? La question est difficile et n'a pas de réponse universellement admise. Et pourtant, il est si présent dans nos vies et nos conversations ! Au détour de diverses situations (élections par tirage au sort, tir d'un pénalty, prévisions météorologiques, etc.), cette bande dessinée explique avec à la fois humour et rigueur des notions délicates : effet papillon et chaos, suites aléatoires, probabilités subjectives, volatilité… le tout parsemé d'éléments d'histoire des sciences. Un bon livre de vulgarisation, mais aussi de culture. À partir de 12 ans.

Les Fourmis

Stéphanie Ledu et Anne Rouquette

Milan, 2016 (30 pages, 7,40 euros).

Pour les myrmécologues en herbe, de 3 ans à 6 ans, ce livre est une bonne affaire. Au détour de pages illustrées avec moult détails, le jeune lecteur et la jeune lectrice découvrent le quotidien des fourmis, depuis la vie dans la fourmilière jusqu'à la quête de nourriture. Les 12 000 espèces connues ont plus étonnantes les unes que les autres, entre celles qui font de l'élevage de pucerons, celles qui cultivent des champignons ou encore celles qui pratiquent le nomadisme. Et, comme l'indique l'ouvrage, les scientifiques continuent de découvrir de nouvelles espèces. De quoi susciter des vocations !

BLOC-NOTES

IL NOUS FAUDRAIT UN BON MYTHE

Jadis, certains adultes – pas futés – disaient à propos des jeunes : « Il leur faudrait une bonne guerre ! » Je dirais aujourd'hui – en espérant ne pas faire preuve à mon tour de bêtise : « Il nous faudrait un bon mythe ! »

Des mythes, nous en avons. Nous croyons, par exemple, à celui constitué par la conjonction créativité-puissance-progrès-maîtrise. Chacun se veut puissant et créateur – de concepts, de vêtements, d'événements, de modes, d'entreprises… Et d'enfants : dans nos pays, une condition à peu près nécessaire et suffisante pour qu'un couple ait un enfant est qu'il le décide. Si besoin, il se fera aider par des techniques élaborées. L'idée que la venue d'un enfant exprime la volonté de Dieu ne peut plus être un mythe largement admis.

Pourtant, notre désir de croire en la toute puissance humaine est en butte à des démentis permanents. Nombre d'affaires se fracassent sur des obstacles imprévus.

Un mythe mieux adapté devrait être à la fois prométhéen, pour entrer en résonance avec l'extraordinaire maîtrise technique atteinte par notre société, et fataliste, pour rendre compte du fait que l'avenir se joue souvent des projets humains. Deux exigences difficiles à concilier !

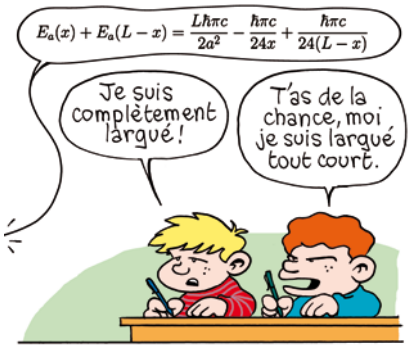
Quant à la possibilité d'une société sans mythe, elle est elle-même un mythe auquel j'ai renoncé. Le sociologue et philosophe Raphaël Liogier me semble dans le vrai lorsqu'il écrit : « L'erreur désastreuse serait de croire que la raison peut se passer d'utopie et de transcendance. Priver les hommes de mythes, c'est rendre le monde suffisamment étouffant, sous un vide nihiliste, pour qu'éclatent les violences les plus irrationnelles » (*Le Monde*, 5 août 2016).

COMPLÈTEMENT EXCESSIF

Un matin, on me dit : « Pense à faire cela dans la journée. » Le soir, on me demande si je l'ai fait. Réponse : « Aïe ! J'ai complètement oublié. » Pourtant, dès qu'on m'en reparle, ce dont j'étais chargé me revient en mémoire. Tel n'est pas le cas lorsque je dis : « Si j'ai lu ce livre dans ma jeunesse ? Peut-être, j'ai oublié ». Là, l'oubli est plus profond. Ainsi, « avoir complètement oublié » peut désigner un oubli provisoire, « avoir oublié » un oubli définitif.

Accuser quelqu'un d'être « complètement fou » ne signifie pas qu'il faut l'interner, mais que son comportement caractériel est pénible. Par contre, celui qui est déclaré fou, lui, peut faire partie des gens promis à l'hôpital psychiatrique.

« Ce que tu as dit est complètement vrai » n'est pas synonyme de « Ce que tu as dit est vrai ». Il est des situations où la seconde phrase est justifiée, mais la première fait douter de la rigueur de celui qui a prononce. En disant « complètement », il exprime la volonté d'adhérer à 100 % – sinon plus ! Il y a, dans son enthousiasme appuyé, un excès qui réduit la portée de son approbation plutôt qu'il ne la renforce.



Insérer « complètement » dans une phrase en augmente le volume mais, souvent, diminue sa densité au point de lui faire perdre du poids.

LANGAGE NON COMMUTATIF

Divers effets de la non-commutativité des mots en français.

Art. Si je dis : « Tel tableau est au Prado, à Madrid », je suppose mon interlocuteur inculte, et me hâte de lui spécifier où se trouve le musée du Prado. Si je dis : « Tel tableau est à Madrid, au Prado », je le suppose au contraire assez familier avec les musées de Madrid pour que la précision lui parle.

Psychologie. « Bon à quoi ? » s'interroge l'adolescent tourmenté quant à ses aptitudes. « À quoi bon ? » répond-il, désespéré par la marche du monde.

Garantie des libertés. En république, on a le droit de dire (à peu près !) n'importe quoi, mais on n'épuise jamais un sujet. On peut tout dire, on ne peut pas dire tout.

En mathématiques, « A est B » équivaut à « B est A ». Exemple : « Le triangle est rectangle » équivaut à « Le rectangle est triangle ».

Vie sociale. « Je n'étais pas loin de m'ennuyer » ou « j'étais loin de ne pas m'ennuyer » ? Nuance !

Selon la logique formelle, une affirmation qu'aucun contre-exemple ne permet de réfuter est vraie. L'affirmation « les éléphants gris sont roses » est fausse, mais « les éléphants roses sont gris » est vraie, puisque, pour la réfuter, il faudrait trouver un éléphant rose. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Décembre 2016 – N° d'édition MU220420-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : Presstalis – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 1017213231 – Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous, l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

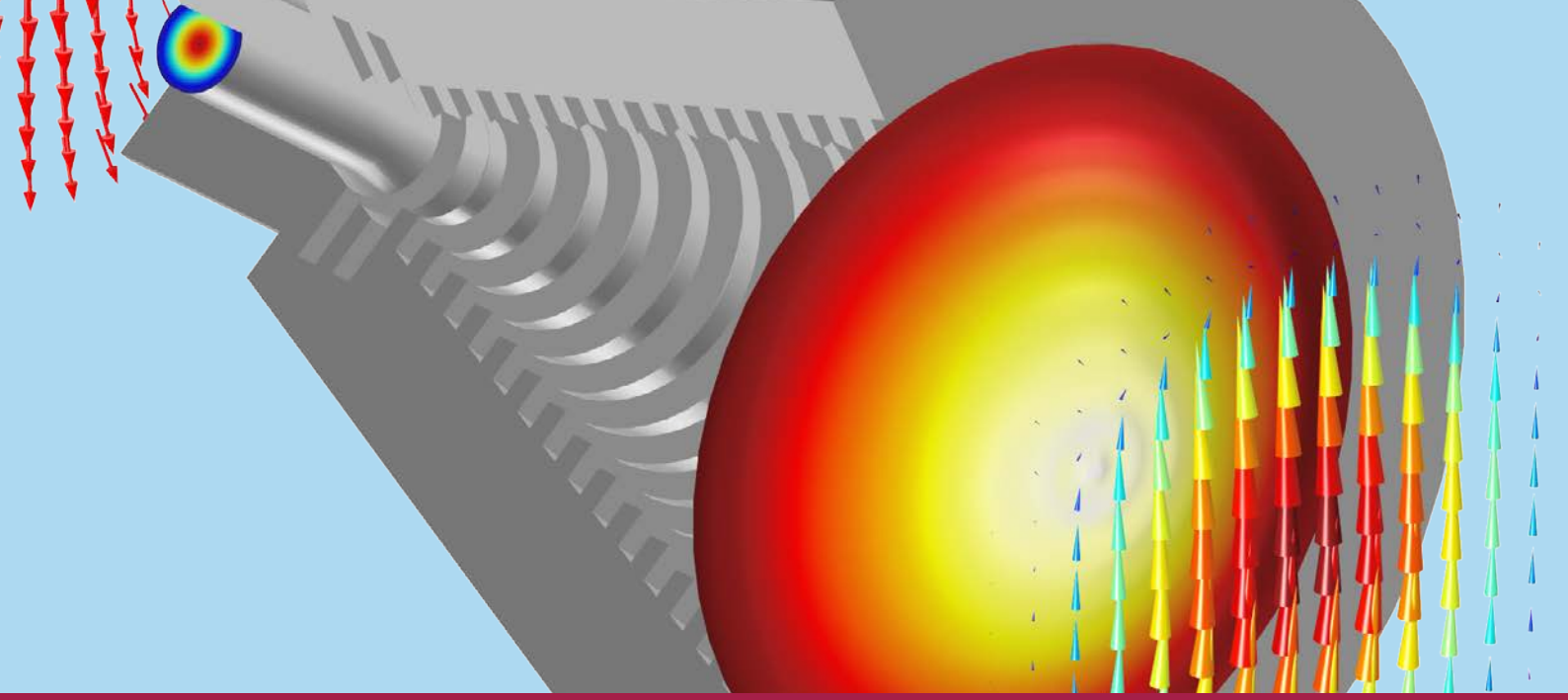
ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

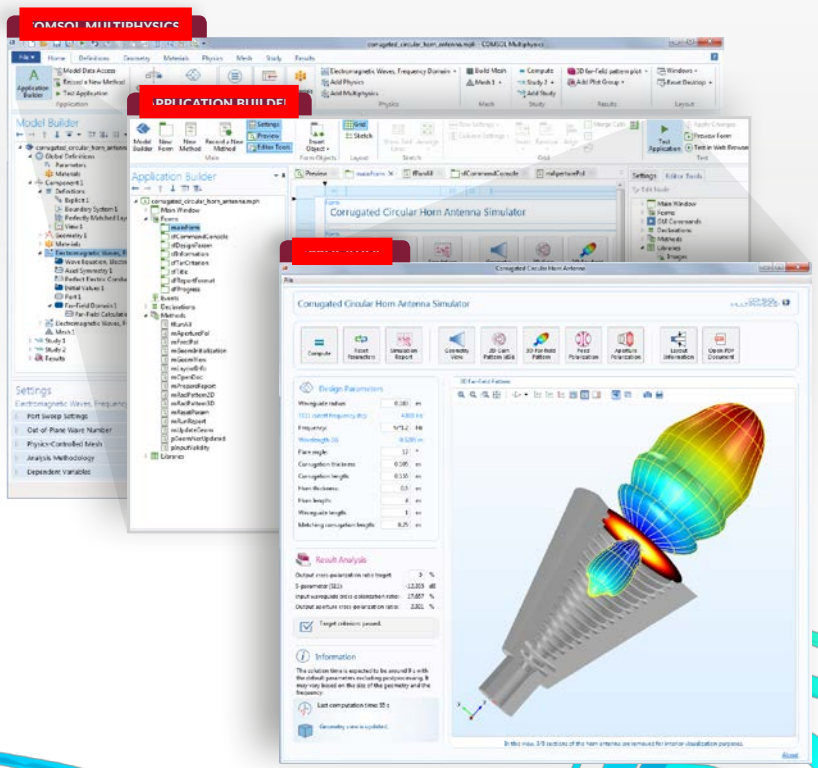
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



COMSOL

© Copyright 2016 COMSOL. COMSOL, the COMSOL logo, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink, and Simulation for Everyone are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks.