

Sept ans après : Fukushima, affaire classée ?

10 mars 2018, 11:59 CET



Sur le site de Fukushima, en janvier 2018. Behrouz Mehri/AFP

Sept années après l'accident de Fukushima (survenu le 11 mars 2011), tout ou presque a été dit sur ses causes. Pourtant, les conclusions des experts ne prêtent que peu d'attention au récit de Masao Yoshida, alors directeur de la centrale et décédé en 2013.

Qui sait quelles décisions il a dû prendre pour éviter le pire entre le 11 et le 15 mars 2011 ? Son témoignage, disponible en français, remet en cause à lui seul les fondements de la sûreté nucléaire.

Une catastrophe « Made in Japan »

L'accident a été rapidement qualifié par la communauté internationale et par les Japonais eux-mêmes comme un accident *Made in Japan*, dans le sens où il relève d'un double particularisme : les aléas naturels caractéristiques du Japon (les séismes et les tsunamis) et la culture nipponne dans sa collusion avérée, ou pas, entre les industriels et le pouvoir politique.

La gestion de l'accident, tout à la fois par l'industriel Tepco et par le gouvernement nippon, a été très durement jugée pour son inefficacité. De graves défaillances dans l'intervention des opérateurs, qui n'ont pu éviter la fusion des réacteurs et les explosions qui s'en sont suivies. Tout au plus reconnaît-on une certaine forme d'héroïsme des acteurs de terrain.

L'étiquette *Made in Japan* souligne la faillite d'un système sociotechnique qui se serait tenu bien trop loin des bonnes pratiques de la filière et des normes internationales, celles de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Ainsi, le caractère inéluctable de l'accident et la spécificité de ses causes en

Auteur



Franck Guarnieri

Directeur du Centre de recherche sur les risques et les crises, Mines ParisTech



Langues

- English
- Français

seraient étonnamment un cas à part. Sa dimension extraordinaire lui permet d'ailleurs de rejoindre dans l'histoire un autre accident « anormal », celui de Tchernobyl (dû à l'incurie soviétique), confortant *de facto* l'utopie d'une filière nucléaire « hautement fiable et sûre ».

Les enquêtes et expertises ont été nombreuses : une commission d'enquête gouvernementale et une commission d'enquête parlementaire japonaises, les investigations de l'AIEA, de la NRC américaine, de l'OCDE par l'intermédiaire de l'AEN...

Les analyses ont principalement porté sur les conséquences du séisme et du tsunami sur l'installation industrielle, sur la gestion de la crise par l'exploitant et les autorités, sur les modalités de coopération entre les acteurs sur site et hors site (les services de secours et les moyens externes de Tepco). Des dizaines de milliers de pages de rapports ont été rendues publiques. Au final, les autorités concluent unanimement que le seul respect des normes de l'AIEA suffit à garantir la sûreté nucléaire.

Que dire alors des auditions des parties prenantes, plus de mille, demeurées pour la plupart confidentielles ? Ceci n'est pas sans poser un problème au fonctionnement de la démocratie : accepterait-on, en France, que les auditions d'une quelconque commission d'enquête parlementaire ne soient pas rendues totalement publiques ?

Au Japon, il faudra attendre septembre 2014 pour que l'audition du directeur de la centrale de Fukushima Daiichi, Masao Yoshida, à la suite de propos diffamatoires dans la presse, soit enfin révélée. Il s'agit d'un document de plus de quatre cents pages rendant compte de près de vingt-huit heures d'audition.

Un récit pour réécrire l'histoire

L'audition de Yoshida a été traduite en français à l'initiative du Centre de recherche sur les risques et les crises (CRC) de Mines ParisTech. Cette tâche aurait dû incomber à un exploitant de la filière ; cela n'a pas été le cas, au motif certainement que tout avait déjà été dit et résolu par les rapports d'enquête.

La lecture du récit nous ouvre pourtant un nouvel horizon pour penser la gestion d'un tel accident. Naturellement, les enquêteurs qui interrogent Yoshida déroulent une grille préétablie, qui n'a d'autres buts que de valider des hypothèses dont l'ambition est de relier des faits à des justifications purement techniciennes.

Face à cela, Yoshida répond selon un tout autre point de vue. Il place au cœur de ses décisions et de ses actions le rapport devenu violent des hommes – les siens et lui-même – à la technique, plus précisément à des machines (les réacteurs) qui se sont libérées soudainement de l'emprise de l'exploitant.

Dès lors, il ne s'agissait plus de gérer une crise, d'appliquer une procédure, de dérouler un plan A, voire un plan B... d'autant que l'extrême violence de la situation a tout fait voler en éclat. Durant quelques jours, la centrale est devenue une île plongée dans l'obscurité (faute d'électricité et de diesels de secours) et le dénuement quasi total.

En grande partie livrés à eux-mêmes, les opérateurs se sont en quelque sorte retrouvés dans la situation du chasseur primitif qui à tout moment peut devenir la proie. Dans la chaleur étouffante de leur tenue de protection, terrorisés par les répliques sismiques, les intervenants sont à l'écoute du moindre bruit, ils

traquent tout indice visuel à défaut de données télémétrées, ils tâtonnent dans les méandres d'un site dévasté et parviennent tant bien que mal à se préserver de la contamination radioactive pour poursuivre leur activité.

Yoshida nous livre ses peurs, ses doutes, ses croyances. Il sublime l'engagement de ses collaborateurs, œuvrant de l'intérieur (au sein de la centrale). Il fustige par contre l'absence et l'incompétence des autres, de tous les autres, ceux de l'extérieur (le siège de Tepco, les forces de secours, le gouvernement, l'autorité de contrôle...).

L'intensité émotionnelle de son témoignage, teintée de tragi-comédie, interpelle, bouscule. Elle fait voler en éclat des rationalités par trop gestionnaires, qui appauvrissent la complexité des situations jusqu'à mépriser ce qui fait humanité. D'autant plus que les travailleurs se retrouvent face à leur propre fin, et bien plus encore, celles de leurs frères d'armes, de leur famille et de tout autre attachement social et identitaire.

Au bout de quatre jours d'une lutte acharnée, le pire (l'explosion des réacteurs de Daiichi et les très probables « sur-accidents » des centrales de Daini et Onagawa toutes proches) a été évité de bien peu, presque miraculeusement.

Face à une catastrophe non advenue, qu'avons-nous appris ? Presque rien...

Au-delà des marges de sécurité

Bien évidemment, le réexamen des normes de sûreté (les « stress tests ») est utile, comme l'est la construction d'un noyau dur (sorte de ligne Maginot, dressée en rempart contre les agressions externes) ou l'installation de coûteux diesels de secours (les grands oubliés du nucléaire français avant Fukushima, censés fournir de l'électricité aux équipements de sûreté en cas de défaillance des alimentations électriques).

Ces dispositions augmentent sans aucun doute les marges de sécurité. Mais qu'en est-il au-delà ?

La création des « forces spéciales » du nucléaire (la FARN, Force d'action rapide du nucléaire d'EDF) illustre bien cet enjeu. Elles se tiennent prêtes à intervenir pour restaurer – et non liquider – les installations, dans le respect de la loi en matière d'exposition aux radiations... Que feront-elles si la radioactivité dépasse les seuils fixés par le législateur ? Pourra-t-on compter sur leur engagement, comme celui de Yoshida et les siens, tout à la fois héros et victimes sacrifiées d'autorité ou par libre consentement, pour éviter l'apocalypse ?



Masao Yoshida en 2012. Jiji Pres/Japan Pool/AFP



énergie

Tchernobyl

nucléaire

Asie

EDF

gestion des risques

Fukushima

centrales nucléaires

Japon



Mission Cassini Bilan d'une odyssée extraordinaire

UNIVERS

Astronautique. Vingt ans après avoir quitté la Terre pour Saturne, la mission Cassini-Huygens, qui s'est achevée en septembre, aura permis de précieuses découvertes, bouleversant notre vision du système solaire. Retour sur cette odyssée extraordinaire, fruit d'une vaste collaboration entre les États-Unis et l'Europe.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Elle a révolutionné les connaissances sur Saturne. Suscité de nouvelles interrogations sur le système solaire. La mission Cassini-Huygens de la Nasa, de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Agence spatiale italienne (ASI), s'est achevée le 15 septembre 2017, après un voyage de vingt ans. Ce jour-là, la sonde Cassini a pénétré dans les hautes couches de l'atmosphère saturnienne. Durant les une à deux minutes d'une chute vertigineuse de 420 kilomètres, elle a envoyé d'ultimes informations sur la composition des gaz et des plasmas, les

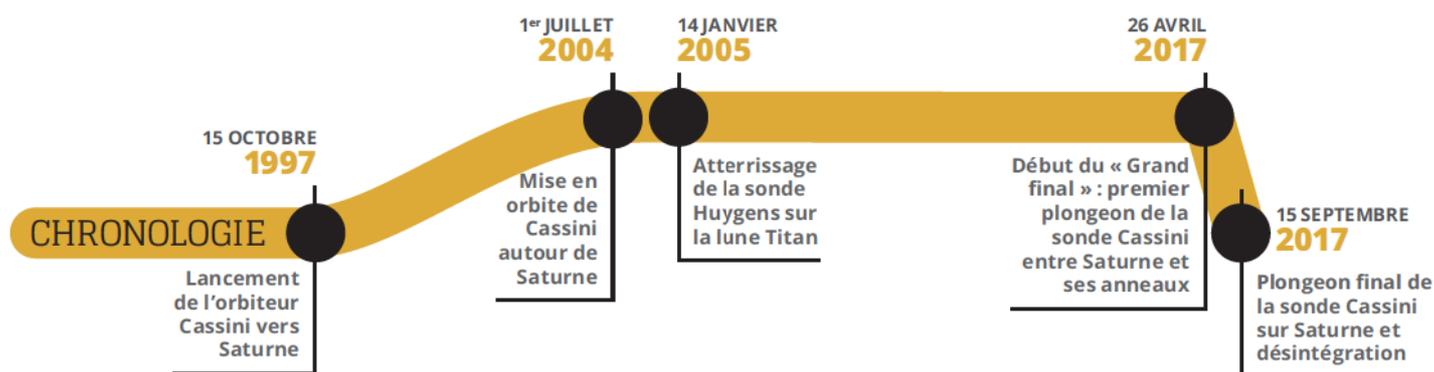
températures et le champ magnétique des milieux rencontrés. Avant de cesser brusquement d'émettre et de se désintégrer sous l'effet combiné des fortes turbulences et de la formidable chaleur produite par sa traversée de l'air à 111 000 kilomètres à l'heure.

Nul doute qu'à cet instant, les astronomes du monde entier ont eu un pincement au cœur tant fut extraordinaire l'aventure que leur a permis de vivre cette machine envoyée à 1,43 milliard de kilomètres de notre planète.

1. Parmi les nombreux laboratoires ayant participé à la mission, on trouve le Lisa, le LPGN, le Lesia, le LPC2E, le Latmos, l'Irap, le Lerma, l'IAS, le LPP et l'IMCCE. Par ailleurs, trois chercheurs du CNRS ont été nommés « scientifiques interdisciplinaires » (IDS) – Daniel Gautier, François Raulin et Michel Blanc –, deux autres « principaux chercheurs » (PI) – Guy Israël et Marcello Fulchignoni pour les instruments ACP et HASI de Huygens – et une bonne douzaine d'autres « co-chercheurs » (co-Is). 2. Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (CNRS/Observatoire de Paris/UPMC/Université Paris-Diderot). Athéna Coustenis est associée aux instruments HASI et DISR de la sonde Huygens et CIRS et VIMS de la sonde Cassini. 3. Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (CNRS/Université Paris-Est Créteil/Université Paris-Diderot). François Raulin est associé aux instruments ACP et GCMS de Huygens et CISR de Cassini.

Vue d'artiste de la sonde Cassini en orbite autour de la planète Saturne.

© NASA/JPL-CALTECH



Une prouesse technique et humaine

Une aventure extraordinaire tout d'abord par sa durée. Imaginée en 1982, lancée en 1997, la sonde arrive dans la région de Saturne en 2004, après un long périple à travers le système solaire. Sa mission, prévue au départ pour quatre ans, en durera finalement treize. Elle permettra aux scientifiques d'observer la planète géante et sa lune Titan pendant deux saisons entières de l'année saturnienne – qui dure 29 années terrestres.

Ensuite, sur le plan technologique et humain. Pour économiser le carburant des sondes, Cassini-Huygens a expérimenté une méthode qui n'avait jusqu'ici été testée que pour la sonde Galileo, lancée par la Nasa autour de Jupiter. Il s'agissait de se servir de l'attraction gravitationnelle de Titan pour les changements d'orbite. En modifiant sa vitesse à chacun de ses 127 survols de la lune, la sonde a pu naviguer à travers le système de Saturne beaucoup plus longtemps que prévu.

On lui doit également l'atterrissage le plus lointain jamais réalisé à ce jour : emportée à bord de l'orbiteur Cassini, la sonde Huygens, développée par les chercheurs européens de l'ESA, s'est en effet posée le 14 janvier 2005 sur le sol de Titan. Une prouesse scientifique qui a permis aux astronomes de recueillir pour la première fois des images de la surface du plus grand satellite de Saturne.

La collaboration internationale autour de cette mission aura été exceptionnelle, puisqu'elle réunit trois agences spatiales représentant 19 pays, avec à son bord 18 instruments scientifiques – 12 sur Cassini et 6 sur Huygens. La construction de ces instruments a impliqué des dizaines d'équipes, dont nombre du CNRS¹, qui s'est distingué par des responsabilités importantes tout au long de la mission.

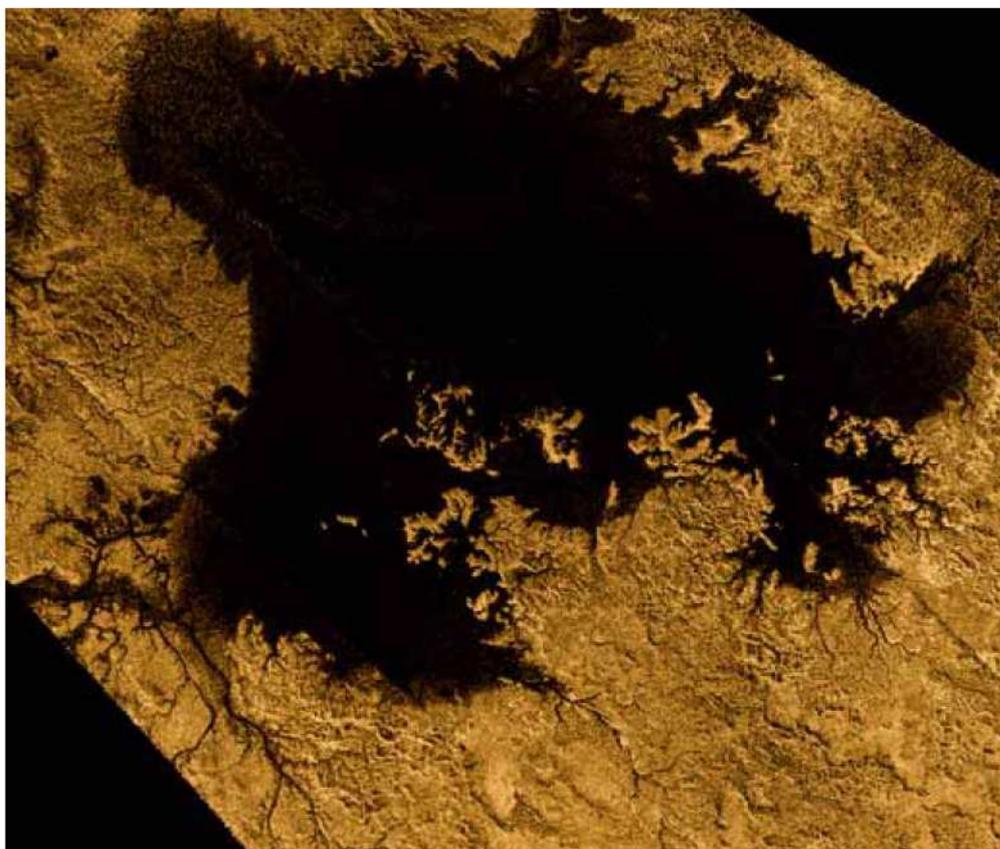
La mission Cassini-Huygens occupera une place à part dans l'histoire de la conquête spatiale en raison de ses découvertes. Elle a donné

lieu à plus de 3 900 publications scientifiques, qui ont contribué non seulement à bouleverser les connaissances sur Saturne et ses 62 satellites (dont 6 ont été mis au jour par Cassini), « *mais aussi*, estime Athéna Coustenis, directrice de recherche CNRS au Lesia² et engagée dans la mission depuis le début, à *changer radicalement l'idée que se faisaient les astronomes du système solaire en général* ».

Titan, si proche de la Terre

« *Jusqu'en 2004, les spécialistes savaient peu de chose sur Titan, le plus gros des satellites de Saturne – 5 100 km de diamètre – qui n'avait été vraiment survolé qu'une seule fois, en 1980, par la sonde Voyager 1* », raconte François Raulin, chercheur au Lisa³ et scientifique interdisciplinaire (IDS) en charge de l'exobiologie pour la mission Cassini-Huygens. La nature de la surface de Titan, ...

▲ La Ligeia Mare, sur la lune Titan, est une vaste étendue liquide constituée en majeure partie d'éthane et de méthane (photographie noir et blanc colorisée).



© NASA/JPL-CALTECH/ASI/CORNELL

... cachée sous les brumes opaques de couleur orangée qui l'enveloppent, était un mystère. Au point que les ingénieurs redoutaient que Huygens finisse noyée ou engloutie dans un océan ou des marécages une fois arrivée au sol. On connaît désormais la composition de ses aérosols ainsi que la température et les constituants de son atmosphère – dominée comme celle de la Terre par de l'azote (96 %), mais aussi riche en méthane et dans laquelle les chercheurs ont eu la surprise de détecter la présence d'ions organiques dans sa partie ionosphérique, à mille kilomètres d'altitude. « Une grande partie de sa surface a été décrite, poursuit François Raulin, mettant en évidence une diversité insoupçonnée » : des montagnes, des cratères, des champs de dunes de nature encore inconnue, mais aussi 200 lacs et une mer alimentés par des réseaux fluviaux où se répandent du méthane et de l'éthane à l'état liquide.

de diamètre seulement, était jusque-là considérée comme un astre mort. Mais, en 2005, la sonde Cassini observe d'énormes panaches de plusieurs centaines de kilomètres de haut, constitués de vapeur d'eau et de grains de glace : ces derniers correspondent vraisemblablement à des remontées de liquides d'un océan sous-glaciaire. Il s'agit là d'une énorme surprise, car jusqu'alors, le seul corps du système solaire connu pour posséder une « mer intérieure » était le satellite Europe de Jupiter (qui est plus près du Soleil). Les astronomes ayant démontré en 2012 que Titan cachait aussi dans son sous-sol un compartiment de ce type, cela a bouleversé la notion même de « zone d'habitabilité » – la zone où de l'eau à l'état liquide peut subsister.

Cette odysée aura également permis d'en apprendre un peu plus sur les fameux anneaux de Saturne : constitués d'une multitude de « particules » de glace d'une taille

comprise entre le millimètre et le décimètre, ils seraient faits à 99 % d'eau, même si certains astronomes contestent ce chiffre et avancent l'idée qu'ils cachent des quantités importantes de silicate, de fer ou de molécules organiques.

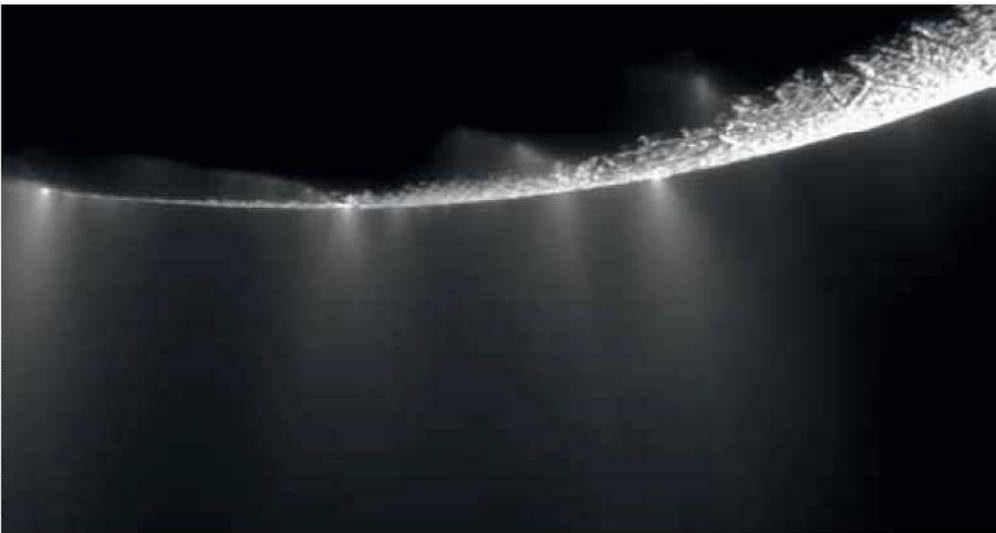
Un grand apport de Cassini est d'avoir démontré le rôle joué par les satellites de Saturne dans la composition et la dynamique de ces structures. La sonde a prouvé que la glace larguée dans l'espace par les jets d'Encelade avait fini avec le temps par créer l'anneau E extérieur. Et que le déplacement de la lune Prométhée sur son orbite expliquait les ondulations qui parcourent la surface de l'anneau F. En scrutant le disque

dans des parties plus internes, elle a aussi démontré que certaines « lacunes » étaient dues à la présence de petites lunes comme Pan, dont les déplacements creusent des sillons dans la surface glacée. L'épaisseur de cette dernière est variable. Dans les régions A et B, elle peut atteindre plusieurs milliers de mètres. L'équivalent de la taille d'une montagne !

Révélation à venir

D'autres découvertes sont encore attendues après le « grand final » entamé le 22 avril 2017 et qui s'est achevé le 15 septembre.

« D'ores et déjà, constate Jean-Pierre Bibring, astrophysicien à l'IAS⁵ qui a contribué au développement de l'instrument VIMS, le système saturnien, avec sa planète



Les jets de particules glacées émis depuis la surface d'Encelade ont révélé la présence d'un océan intérieur.

Les données récoltées durant deux saisons entières de la lune ont permis de voir sa couverture nuageuse évoluer. Un cycle du méthane y façonne des « paysages » et y régit le climat, comme le cycle de l'eau le fait sur notre planète, donnant de Titan l'image d'un astre aux propriétés géophysiques proches de la Terre. Et, remarque Stéphane Le Mouélic, ingénieur de recherche au LPG⁴ de Nantes, collaborateur de l'instrument VIMS de Cassini, « tout comme la Terre, Titan possède des étendues liquides directement exposées à une atmosphère ». Un cas unique dans le système solaire !

Encelade, une lune habitable ?

Encelade est l'autre grande révélation de Cassini-Huygens. Cette petite lune de Saturne, de 500 kilomètres

4. Laboratoire de planétologie et géodynamique (CNRS/Université de Nantes/Université d'Angers). 5. Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/Université Paris-Sud).

En bref

géante, ses satellites qui interagissent avec les anneaux, les alimentent en matériel et les perturbent, est devenu pour les astronomes un laboratoire pour l'étude de certains phénomènes dynamiques clés se manifestant à plus grande échelle. Notamment, ceux qui conduisent à la formation et à l'évolution des systèmes stellaires, dans leur diversité. »

Enfin, grâce à une partie des 453 048 images et 635 gigaoctets de données glanées par Cassini-Huygens, Saturne est elle-même mieux connue. Placée aux premières loges durant treize ans, la sonde a décrit comment le climat de la planète géante change en fonction des saisons. Elle a assisté en direct au développement et à la fin d'une énorme tempête lors de l'équinoxe. Des clichés inédits ont été réalisés du fameux motif nuageux hexagonal qui occupe en permanence, au nord, les hautes latitudes.

L'ultime phase de la mission apportera pour la première fois des informations *in situ* sur la composition de l'atmosphère saturnienne. Elle permettra

par ailleurs de cartographier avec précision son champ de gravité, afin d'en déduire la taille de son éventuel noyau ou de déterminer si les structures en « bandes » et en « ceintures », visibles à sa surface, se développent en grande profondeur. Elle pourrait enfin contribuer à expliquer pourquoi Saturne est la seule planète du système solaire à posséder un champ magnétique aligné avec son axe de rotation. Ce curieux phénomène est probablement à l'origine de la difficulté qu'ont les astronomes à préciser la durée des journées saturniennes, dont les longueurs semblent fluctuer dans les enregistrements de plus ou moins 1 h 45. En mesurant très précisément le champ magnétique de Saturne et son rayonnement radio, l'engin spatial devrait, là encore, apporter des réponses... Fin de la mission ou pas, les astronomes sont encore loin d'en avoir terminé avec Cassini-Huygens. ||

Le système saturnien est devenu un laboratoire pour les astronomes.



Lire l'intégralité de l'article sur lejournald.cnrs.fr

PHILOSOPHIE

Le 25 septembre, le CNRS, l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et la Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität de Bonn ont officiellement créé le Centre de recherches sur les nouveaux réalismes. Les recherches en philosophie fondamentale menées dans ce laboratoire international associé porteront notamment sur la question du rapport entre normes et réalité.

MOBILITÉ

Le Groupe PSA et le CNRS viennent de signer un nouvel accord-cadre de collaboration d'une durée de cinq ans. Visant à relever les défis de la mobilité de demain, cet accord vient prolonger un partenariat construit depuis plus de vingt ans autour de collaborations impliquant une quarantaine de laboratoires du CNRS.

FESTIVAL

Organisée tous les deux ans par le CNRS et l'université de Lorraine, la compétition de films « Sciences en Lumière » (ex-Festival du film de chercheur) est de retour en 2018. L'occasion de faire découvrir au grand public des travaux scientifiques, au travers de films dont l'écriture ou la réalisation ont impliqué des acteurs de la recherche. L'appel à films est ouvert jusqu'au 31 décembre.



>> www.sciencesenlumiere.fr

OPTIQUE

Le CNRS et le groupe Thales se sont associés pour créer le laboratoire commun Systèmes optiques et instrumentation embarquée. L'objectif des recherches qui seront menées chez l'industriel et au Laboratoire d'astrophysique de Marseille est de développer des technologies pour de futurs instruments d'astronomie spatiale, de surveillance de l'espace, de défense et de sécurité.

INSTRUMENT

Le 1^{er} septembre, le laser à électrons libres European XFEL a été inauguré près de Hambourg, en Allemagne. En produisant des flashes de rayons X ultra-lumineux, deux cents fois plus nombreux par seconde que les meilleurs lasers à électrons libres, cet instrument européen permettra de cartographier les détails atomiques des virus, de déchiffrer la composition moléculaire des cellules, de réaliser des images tridimensionnelles du nanomonde ou encore de filmer des réactions chimiques. Onze pays ont participé à sa construction, pour un budget total de 1,2 milliard d'euros. En France, le CEA et le CNRS ont joué un rôle de premier plan dans la conception et la construction de l'accélérateur supraconducteur à électrons.

Le fugace nuage bleu du champagne

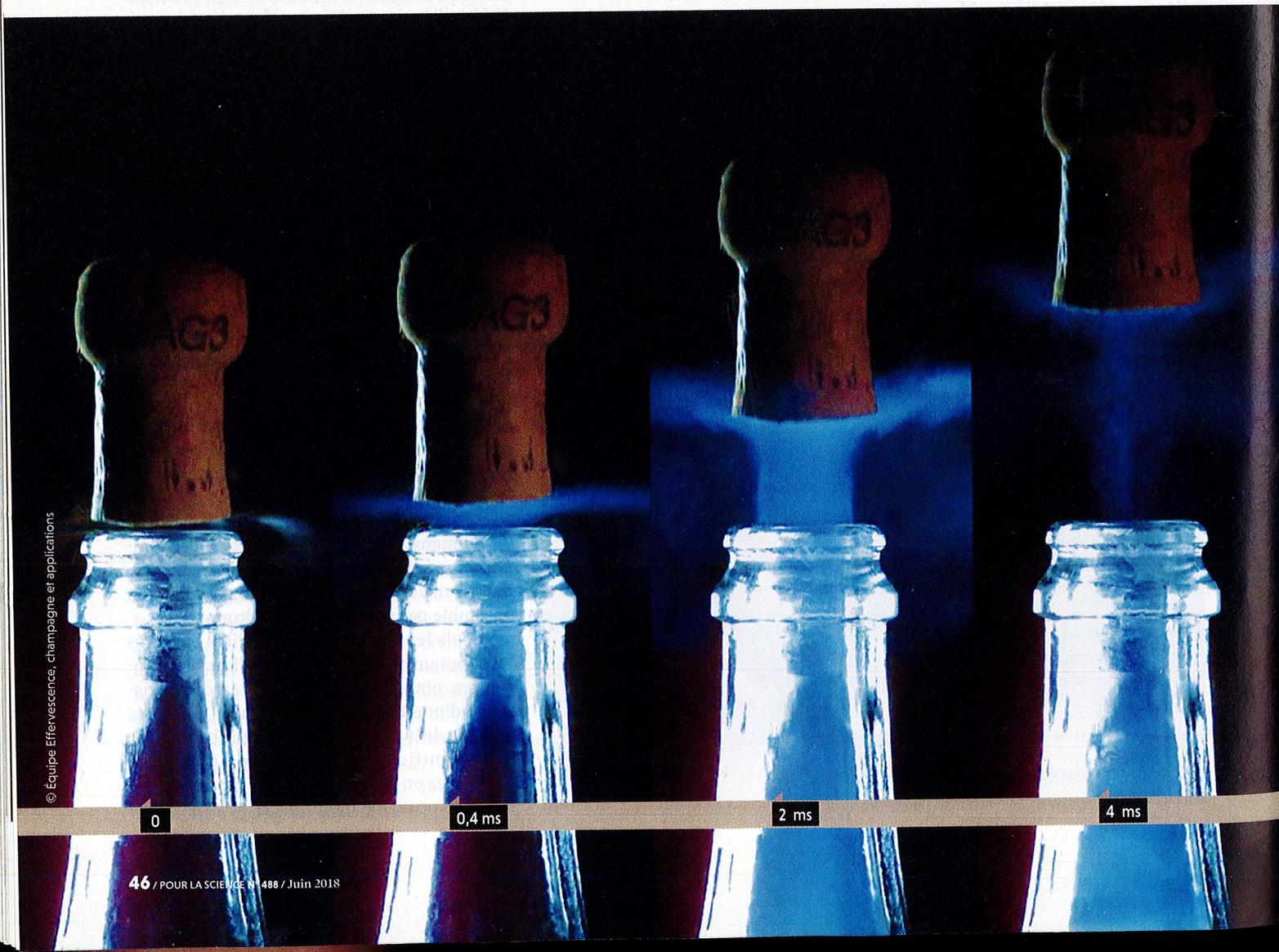
© Equipe Effervescence, champagne et applications

0

0,4 ms

2 ms

4 ms



L'ESSENTIEL

> Quand on débouche une bouteille de champagne stockée à 20 °C, on observe un nuage bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon.

> Ce phénomène, qui ne se produit pas avec une bouteille froide, ne dure que quelques millisecondes : après, le nuage de condensation blanchit.

> Les auteurs ont proposé un modèle théorique qui explique l'apparition du panache bleuté et sa disparition.

> L'aspect bleuté résulte de la diffusion de la lumière ambiante par de minuscules cristaux de dioxyde de carbone, bien plus petits que les longueurs d'onde de la lumière visible.

LES AUTEURS



GÉRARD LIGER-BELAIR
professeur de physique à l'université de Reims, fondateur de l'équipe Effervescence au laboratoire GSMA (UMR CNRS 7331)



DANIEL CORDIER
astrophysicien, chargé de recherche de recherche du CNRS au sein du GSMA (Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique)



JACQUES HONVAULT
ingénieur des Arts et Métiers, photographe et spécialiste de l'imagerie numérique à haute vitesse

Débouchez une bouteille de champagne stockée à 20 °C et filmez la scène au ralenti : vous pourrez constater l'apparition, pendant quelques millisecondes, d'un panache bleuté dans le sillage du bouchon. Ce phénomène, remarqué il y a quelques années, a désormais son explication. La voici.

Cette séquence de clichés montre la première seconde du débouchage d'une bouteille de champagne gerbeuse, à 20 °C.



En moyenne, ce sont près de dix bouchons de champagne qui sautent chaque seconde dans le monde. Et ce chiffre explose bien entendu aux moments festifs de l'année.

Les tout premiers millièmes de seconde qui suivent le débouchage retiennent aujourd'hui toute notre attention: c'est l'instant précis où l'énergie enfermée dans la bouteille se libère, en permettant au gaz carbonique dissous dans le liquide de s'échapper sous forme de bulles.

Il y a quelques années, en filmant le débouchage d'un lot de bouteilles de champagne stockées à température ambiante, nous avons constaté un phénomène aussi curieux qu'inattendu: dans le sillage du bouchon qui saute, apparaît un nuage bleu azur. À l'époque, nous n'avions pas pu expliquer de façon satisfaisante son origine. Ce n'est que récemment que nous avons proposé et publié, après examen par des pairs, un modèle théorique du phénomène, et c'est cette explication que nous présentons ici.

LE DÉBOUCHAGE DU CHAMPAGNE AU RALENTI

L'étude des quelques millièmes de seconde qui suivent le débouchage d'une bouteille de champagne s'inscrit dans un programme de recherche ambitieux dont l'objectif est de mieux comprendre un phénomène redouté des élaborateurs de vins effervescents: le gerbage, terme qui désigne la production excessive de bulles et de mousse à l'ouverture de la bouteille.

Quand on débouche une telle bouteille, on observe qu'elle gerbe moins de une demi-seconde après son débouchage (*voir la séquence de photographies pages précédentes*). Mais remontons le temps et observons ce qui se passe en amont de cet instant. Environ 0,4 milliseconde après le débouchage, on voit apparaître un nuage de condensation bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon qui saute. Quelques millisecondes plus tard, ce nuage bleuté disparaît du sillage du bouchon, mais demeure encore très persistant dans le goulot de la bouteille, où sa couleur vire progressivement au blanc-gris.

Afin de comprendre l'origine du nuage bleu, nous avons examiné les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de bouteilles stockées à différentes températures (*voir les photographies page suivante*). Pour ce faire, nous disposions de 30 bouteilles de champagne rosé, que nous avons réparties en trois lots de 10 bouteilles. Quarante-huit heures avant de réaliser nos observations, les trois lots ont été stockés à des températures respectives de 6, 12 et 20 °C.

Les phénomènes de condensation survenant lors du débouchage d'une bouteille de champagne (ou de toute autre boisson gazeuse)

froide ont été décrits et compris par les scientifiques il y a déjà longtemps. L'explication couramment proposée est la suivante.

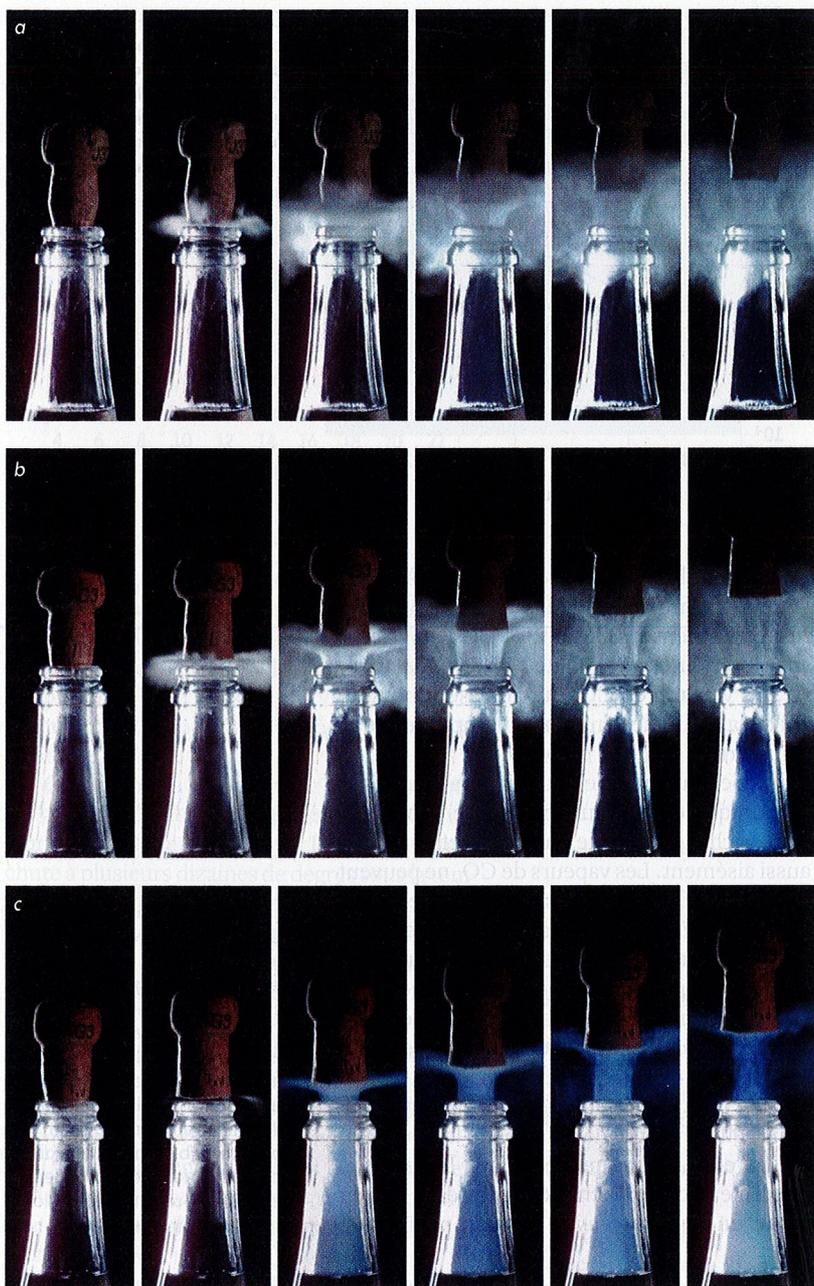
Au moment du débouchage, la décompression brutale du gaz sous pression présent dans le col de la bouteille s'accompagne d'une chute de sa température (les physiciens parlent d'une détente adiabatique). Ce nuage de gaz froid refroidit l'air ambiant. Or ce dernier contient de la vapeur d'eau. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense sous la forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. La diffusion de la lumière ambiante par ces gouttelettes se fait de façon quasi isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Cela confère au panache de condensation une teinte blanchâtre.

Ce mode de diffusion de la lumière, où la taille des objets qui diffusent le rayonnement est comparable ou supérieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante (de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), est connu sous le nom de diffusion de Mie, du nom du physicien allemand Gustav Mie, mort en 1957.

Dans le goulot de la bouteille, le nuage bleu persiste mais devient blanc-gris

La description que nous venons de donner est bien conforme à ce que l'on observe quand on débouche des bouteilles stockées à 6 °C ou à 12 °C. D'ailleurs, à une tout autre échelle, celle de l'atmosphère, les nuages voient le jour selon le même principe: des masses d'air chargées de vapeur d'eau montent en altitude et se refroidissent progressivement, ce qui entraîne la condensation de leur eau en masses nuageuses – lesquelles sont visibles grâce à la diffusion de la lumière solaire par leurs gouttelettes d'eau, diffusion qui fait apparaître blancs ou gris les nuages.

Cependant, dans le cas d'une bouteille de champagne stockée à la température ambiante



de 20°C, pourquoi le nuage de condensation apparaît-il directement dans le goulot de la bouteille et pourquoi est-il bleu azur et non pas blanc? La clé de l'énigme se trouve dans la relation qui existe entre la température des gaz qui s'échappent du col de la bouteille et la température initiale de celle-ci.

LA PRESSION DANS UNE BOUTEILLE DÉPEND DE SA TEMPÉRATURE

À la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (la «prise de mousse»), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la méthode traditionnelle se chargent en gaz carbonique

Ces clichés permettent de comparer les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de trois bouteilles stockées respectivement à 6°C (a), 12°C (b) et 20°C (c). L'intervalle de temps entre deux images successives est de 0,4 milliseconde. On constate que le nuage bleu n'apparaît que pour une température initiale assez élevée: sinon, le refroidissement dû à la détente du gaz n'est pas suffisant pour que se forment les minuscules cristaux de dioxyde de carbone qui diffusent le bleu plus efficacement que les autres longueurs d'onde de la lumière.

dissous. Or la solubilité du dioxyde de carbone (CO₂) est très sensible à la température: plus le vin est froid, plus le gaz carbonique y est soluble. Cela implique que, pour une quantité fixe de CO₂ dans une bouteille close, la pression due au CO₂ (sa «pression partielle») régnant dans le col de la bouteille sera d'autant plus faible que la température est basse, puisque la quantité de CO₂ dissous dans le liquide sera plus grande.

On peut calculer avec une grande précision la pression de gaz carbonique qui régne dans une bouteille en fonction de sa température. Pour ce faire, on fait appel à la loi des gaz parfaits, à celle de la conservation de la matière et à la loi de Henry, énoncée en 1803 et selon laquelle la concentration en gaz dissous est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz dans le col de la bouteille, le facteur de proportionnalité étant la solubilité. On trouve ainsi que dans une bouteille de 75 centilitres, la pression de gaz carbonique est de 4,5 bars à la température de 6°C, et qu'elle passe à 7,5 bars pour une bouteille à 20°C.

La température initiale d'une bouteille de champagne doit donc de toute évidence jouer un rôle sur les phénomènes de condensation qui accompagnent son débouchage.

GROS PLAN SUR LA DÉTENTE ADIABATIQUE

De fait, la chute de la température des gaz s'échappant du col dépend directement de la chute de pression qu'ils subissent lorsque le bouchon saute.

En effet, lorsque le bouchon saute, le volume de gaz présent sous pression dans le col de la bouteille se détend brutalement. Il s'agit d'une détente adiabatique, ce qui signifie que le processus se déroule sans échange de chaleur avec l'extérieur. La température du gaz chute alors de façon concomitante pour atteindre une nouvelle température T' donnée par une relation bien connue et qui s'écrit:

$$T'/T = (P_0/P_B)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Dans cette formule, T est la température initiale régnant dans la bouteille encore bouchée, P_0 est la pression ambiante (de l'ordre de 10⁵ pascals, soit 1 bar), P_B est la pression du gaz régnant dans la bouteille bouchée (et qui dépend beaucoup de la température initiale T de la bouteille), et γ (gamma) désigne l'indice adiabatique du gaz, défini comme le rapport de ses capacités calorifiques à pression et à volume constants, et qui est égal à environ 1,3 pour le CO₂.

On peut tracer la température T' atteinte par le gaz en fonction de la température initiale T de la bouteille (voir le graphique page 51). On voit que, de façon assez contre-intuitive, cette température du gaz détendu est d'autant plus basse que la température >

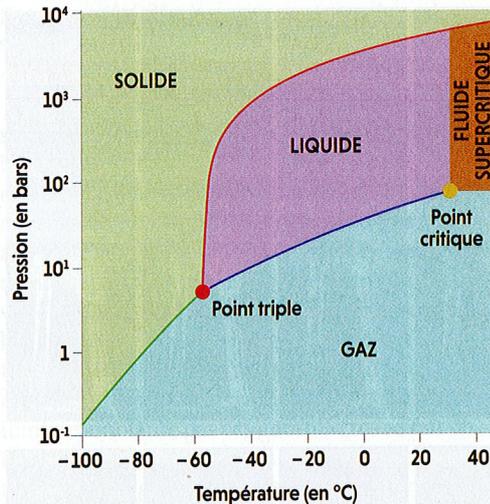
> initiale de la bouteille est élevée. En théorie, la température du gaz qui se détend hors d'une bouteille stockée à 20 °C chute à presque -90 °C! Dans un environnement aussi glacial, que deviennent les différentes espèces gazeuses présentes?

DES CRISTAUX DE NEIGE CARBONIQUE

En fonction de sa température et de sa pression, un corps pur est susceptible d'exister sous trois phases – gazeuse, liquide ou solide. Prenons par exemple le cas familier de l'eau. Sous une pression de 1 bar et à 20 °C, l'eau est liquide. Elle peut se transformer en glace au-dessous de 0 °C et, à 100 °C, elle commence à bouillir pour se transformer intégralement en vapeur.

Qu'en est-il du CO₂? Le diagramme de phase de ce corps pur montre qu'aux températures et aux pressions de quelques bars régnant dans une bouteille bouchée, le CO₂ est un gaz (voir le diagramme ci-dessus). Lorsque le bouchon saute, il se détend brutalement et sa pression rejoint celle de l'atmosphère extérieure, c'est-à-dire 1 bar. Et dans ce processus adiabatique, sa température chute de plusieurs dizaines de degrés (voir le graphique page suivante). Or le diagramme de phase montre qu'à une pression de 1 bar, le CO₂ est gazeux au-dessus de -78,5 °C, mais qu'au-dessous de cette température, il est sous sa forme solide (la glace carbonique).

Si l'on se réfère au graphique montrant la température atteinte après le débouchage en fonction de la température initiale de la bouteille, on remarque qu'une bouteille initialement à 6 °C voit la température des gaz qui s'échappent chuter à près de -77 °C. Autrement dit, il ne fait pas encore assez froid pour que les vapeurs de CO₂ se condensent en glace carbonique.



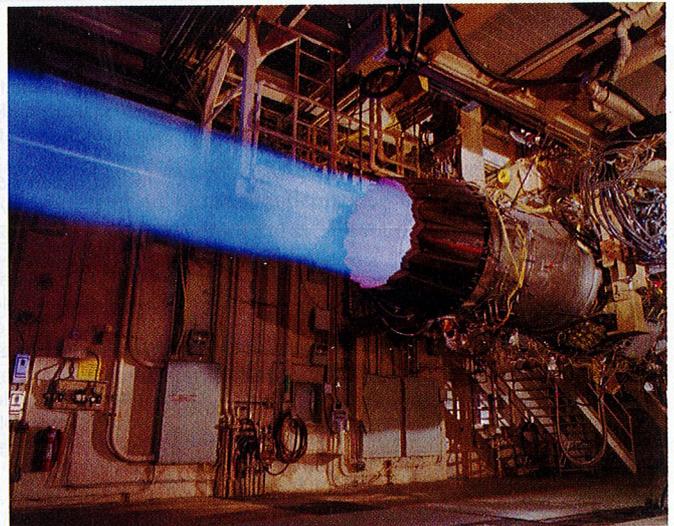
Le diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone. On voit en particulier qu'à la pression atmosphérique (soit 1 bar), des cristaux de CO₂ ne peuvent apparaître que si la température est inférieure à environ -80 °C.

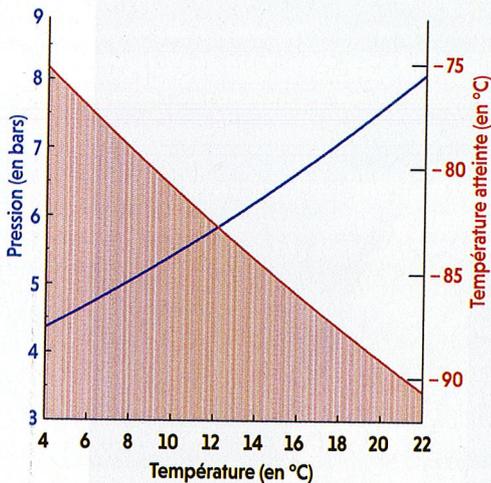
Pour les bouteilles stockées à 12 et à 20 °C, la température des gaz qui se détendent chute respectivement à -83 °C et -89 °C. Ces valeurs sont inférieures au seuil de -78,5 °C. En théorie, les vapeurs de CO₂ qui jaillissent hors du col de la bouteille sont donc susceptibles de se transformer en glace carbonique.

Cependant, même si la température du gaz carbonique chute sous le seuil de condensation, le changement de phase ne s'effectue pas aussi aisément. Les vapeurs de CO₂ ne peuvent pas se transformer en cristaux de neige carbonique *ex nihilo* : il ne fait pas encore assez froid pour cela. Pour se transformer en cristaux, le gaz carbonique a besoin de noyaux de condensation qui serviront de catalyseurs pour enclencher le processus. Et c'est à cette étape qu'un autre acteur du système entre en jeu : la vapeur d'eau – pas celle contenue dans l'air ambiant, mais celle présente dans le col de la bouteille.

En effet, le gaz présent dans le col de la bouteille encore bouchée contient de la vapeur d'eau en équilibre avec le champagne qui,

Les phénomènes de condensation à l'œuvre dans le nuage bleu du champagne sont similaires à ceux que présentent les gaz s'échappant des tuyères d'un réacteur de fusée. Les particules diffusantes y sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible, d'où une diffusion dite de Rayleigh de la lumière ambiante, qui fait apparaître du bleu (davantage diffusé que les autres longueurs d'onde). C'est ce même régime de diffusion qui fait apparaître bleu le ciel.





Ces deux graphiques montrent, en fonction de la température de la bouteille bouchée, la pression partielle de CO₂ régnant dans le col de la bouteille (en bleu) et la température atteinte par le nuage de gaz carbonique après que le bouchon a sauté (en rouge).

longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (centrée autour de 0,6 micromètre environ), ils diffusent bien plus efficacement les petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage de condensation apparaît alors bleuté et non pas blanc comme dans le cas de la diffusion de Mie, où la taille des objets qui diffusent la lumière est comparable à celle de la longueur d'onde incidente.

COMME LE BLEU DU CIEL

Ce mode de diffusion de la lumière par des particules plus petites que les longueurs d'onde incidentes est connu sous le nom de diffusion de Rayleigh (d'après le physicien anglais John Rayleigh, ou Lord Rayleigh, 1842-1919). C'est d'ailleurs le même phénomène qui explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules qui composent l'atmosphère de notre planète sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc bien plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, et c'est pourquoi l'atmosphère terrestre nous apparaît de cette couleur (voir la photographie page précédente).

Et si le nuage de condensation du gaz carbonique ne blanchit pas hors du goulot de la bouteille, c'est parce que les cristaux de neige carbonique dont il est constitué ne peuvent pas croître suffisamment pour atteindre des tailles micrométriques, qui le feraient paraître blanc par diffusion de la lumière ambiante. En effet, l'air ambiant, à une vingtaine de degrés Celsius, agit comme un immense réservoir thermique. Très vite, la température du nuage de condensation remonte alors au-dessus des -78,5°C fatidiques, et les cristaux de neige carbonique se subliment pour se transformer en gaz carbonique. Ainsi, au bout de quelques millisecondes, le nuage bleu s'évanouit au-dessus du goulot.

Cependant, confiné dans le goulot de la bouteille, le nuage de condensation est protégé du réservoir thermique un peu plus longtemps. Les cristaux de neige carbonique sont donc susceptibles de croître autour de leur cœur de glace d'eau. Ils atteignent alors des tailles micrométriques et le nuage de condensation présent dans le goulot change progressivement de couleur. Il vire du bleu profond au blanc-gris, comme on peut clairement le constater sur les photographies reproduites.

En d'autres termes, pour ce qui est de la diffusion de la lumière ambiante, on passe progressivement d'un régime de Rayleigh, dû à des cristaux de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante, à un régime de Mie lorsque la taille des cristaux de neige carbonique devient comparable ou supérieure à ces longueurs d'onde. Le nuage bleu visible lors du débouchage d'une bouteille de champagne à température ambiante et son changement de couleur n'ont ainsi plus de mystères... ■

rappelons-le, est formé d'environ 85% d'eau en volume. La teneur en vapeur d'eau dans le col d'une bouteille augmente avec sa température, selon une loi connue (la loi de Clausius-Clapeyron). Elle passe de 0,9% dans le col d'une bouteille à 6°C, à environ 2,3% pour une bouteille à 20°C.

Comme on l'a vu, lorsque le bouchon saute, les gaz initialement sous pression dans le col d'une bouteille se détendent et leur température chute à plusieurs dizaines de degrés sous la température de congélation de l'eau. Il fait alors si froid que la vapeur d'eau se transforme instantanément en cristaux de glace d'eau *ex nihilo* (c'est-à-dire sans que la présence de noyaux de condensation soit nécessaire), à la différence du gaz carbonique. Ce sont donc les cristaux de glace d'eau nés dans le col de la bouteille qui servent de noyaux solides pour la condensation du gaz carbonique en neige carbonique.

Des phénomènes similaires ont été mis en évidence dans le mélange gazeux qui se détend dans les tuyères des moteurs de fusées (voir la photographie page précédente). Là aussi, les gaz les plus facilement condensables (en général l'eau et le CO₂) servent de noyaux solides qui rendent possible la condensation des espèces présentant des températures de condensation bien plus basses (tels que le dioxygène et le diazote).

Le panache bleu azur qui apparaît dans le sillage du bouchon qui saute et dans le col de la bouteille serait donc la signature de la transformation des vapeurs de CO₂ en cristaux de neige carbonique. Mais pourquoi ce panache est-il bleu, alors que le nuage de condensation de la vapeur d'eau ambiante qui caractérise le débouchage des bouteilles plus froides apparaît plutôt blanc ?

Cette couleur bleue a certainement pour origine la très petite taille des cristaux de neige carbonique qui diffusent la lumière ambiante. En effet, lorsque les cristaux qui diffusent la lumière sont de taille très inférieure aux

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et al., **Unveiling CO₂ heterogeneous freezing plumes during champagne cork popping**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 10938, 2017.

G. Liger-Belair et al., **Un océan dans une flûte de champagne**, *Pour la Science*, n° 459, pp. 36-41, janvier 2016.

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Vapour pressure and adiabatic cooling from champagne : Slow-motion visualization of gas thermodynamics**, *Physics Education*, vol. 45, pp. 608-615, 2012.

B. E. Wyslouzil et al., **Binary condensation in a supersonic nozzle**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 113, pp. 7317-7329, 2000.

R. Batt, **Pop ! Goes the champagne bottle cork**, *Journal of Chemical Education*, vol. 48, p. 75, 1971.

Mis à nu par les ondes térahertz

Entre l'infrarouge et les micro-ondes, les ondes térahertz ont longtemps constitué un domaine en friche. Ce n'est plus le cas. Leurs applications se multiplient, des scanners corporels aux détecteurs de drogues et d'explosifs.

Patrick MOUNAIX

est chargé de recherche du CNRS au Centre de physique moléculaire, optique et hertzienne (CPMOH, UMR 5798), à Talence.

Certains voyageurs ont déjà expérimenté le « scanner corporel » à ondes térahertz dont plusieurs modèles équipent des dizaines d'aéroports dans le monde, notamment en France, à Roissy. Ces portiques de détection mettent virtuellement à nu les passagers inspectés (ce qui pose des problèmes d'intimité) et révèlent, à travers les vêtements et les chaussures, d'éventuels objets ou substances dangereux, tels des armes et des explosifs (voir les figures ci-contre et page 99). Ces dispositifs dédiés à la sécurité des transports aériens témoignent de l'essor spectaculaire qu'a connu ces dernières années la technologie des ondes millimétriques et térahertz.

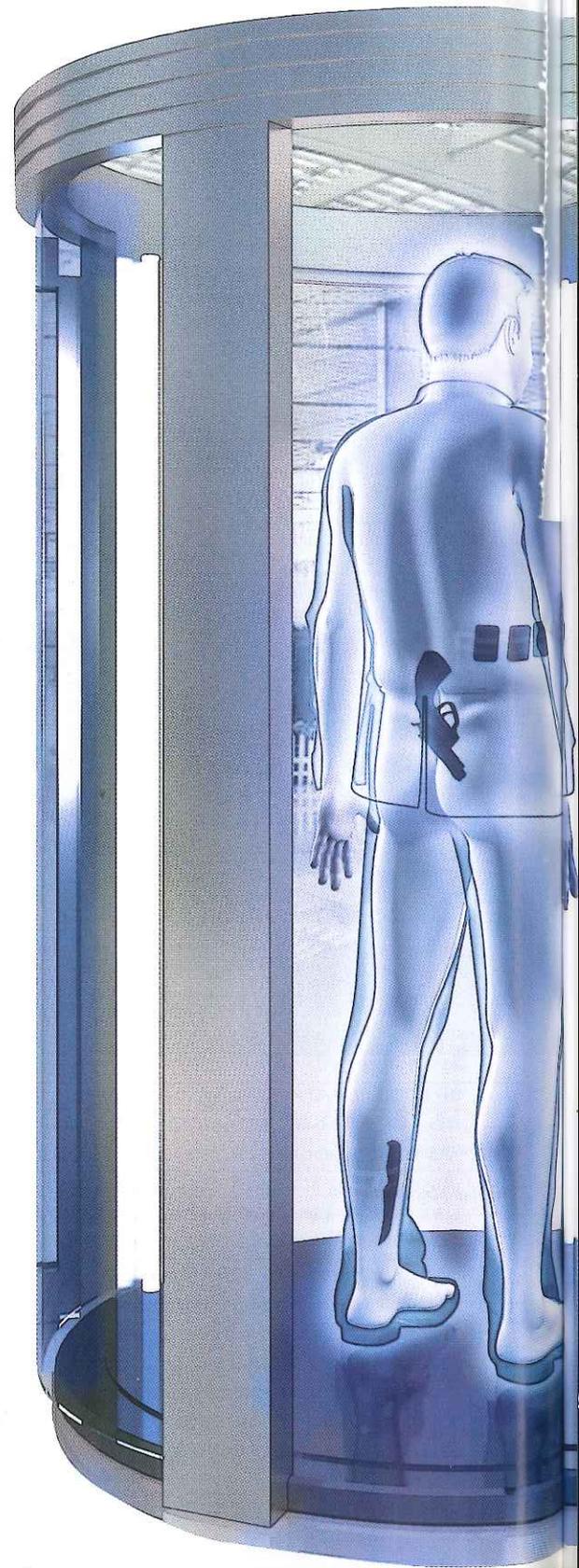
Parfois nommées rayons T, les ondes térahertz sont, comme les ondes radio ou la lumière, des ondes électromagnétiques. Toutefois, leur gamme de fréquences est longtemps restée peu accessible et peu utilisée, faute de sources et de détecteurs adéquats. Cependant, grâce aux progrès de la technologie des semi-conducteurs, les physiciens ont mis au point en laboratoire des lasers peu coûteux, qui émettent dans le domaine du térahertz et qui fonctionnent à une température quasi ambiante: un progrès décisif pour nombre d'applications.

En médecine, en astronomie, en chimie et dans tous les domaines où l'on souhaite préserver intacte la matière et vivants les organismes, les rayons T offrent un intérêt pour caractériser finement, sans contact, les composants d'une substance solide, liquide ou même gazeuse. Quant aux spécialistes de la sécurité, ils utilisent déjà ce type de rayonnement pour dévoiler des armes cachées et invisibles aux rayons X, ainsi que pour déceler à plusieurs mètres de distance de la drogue ou des explosifs. D'abord, rappelons ce qu'est le rayonnement térahertz et quelles sont ses propriétés.

Dans le spectre des ondes électromagnétiques, le domaine du térahertz s'étend d'environ 100 à

L'ESSENTIEL

- Le domaine des ondes térahertz est longtemps resté techniquement peu accessible.
- Grâce aux progrès de la microélectronique et des lasers, la technologie térahertz est en plein essor.
- *A priori* inoffensives, les ondes térahertz sont absorbées par les métaux et l'eau, mais traversent beaucoup d'autres matériaux peu épais.
- Cela les destine à maintes applications, dont certaines sont déjà en cours comme les scanners corporels.



quelques milliers de gigahertz (GHz), soit quelques térahertz (THz). Cela correspond à des longueurs d'onde comprises entre une trentaine de micromètres et deux ou trois millimètres. En d'autres termes, le domaine térahertz est compris entre l'infrarouge et les micro-ondes. De ce fait, les rayons T (on parle aussi d'infrarouge très lointain) ont des propriétés singulières. Non ionisants, à l'instar des infrarouges voisins, ils sont *a priori* inoffensifs pour les organismes vivants. Mais, comme les micro-ondes, ils ont un pouvoir élevé de pénétration et traversent ainsi des matériaux minces, tels les vêtements, une planche de bois, etc.

Non ionisants, mais pénétrants

Les ondes térahertz de basse fréquence sont des ondes millimétriques et se comportent à la façon des ondes radio. À des fréquences plus élevées, elles sont entre le domaine radio et celui de l'optique. On peut donc les focaliser et former une image des objets sondés. Par ailleurs, la plupart des molécules organiques ont des fréquences de résonance fondamentale (de rotation ou de vibration) dans le domaine des térahertz; la détection et l'analyse de leur spectre térahertz autorisent donc leur identification.

Enfin, le rayonnement thermique à la température du corps humain a une composante notable dans ce domaine de fréquences: les humains (et d'autres animaux) émettent naturellement des photons térahertz. On peut ainsi utiliser des techniques passives, où le dispositif d'imagerie ou de

détection n'émet pas d'ondes exploratrices. C'est un avantage dans le domaine militaire, car le dispositif est alors indétectable, à l'inverse par exemple des radars usuels.

La connaissance et l'utilisation d'un rayonnement supposent qu'on sache le détecter, le mesurer et le produire. Le rayonnement térahertz a été étudié pour la première fois par le physicien et botaniste indien Jagadis Bose à la fin du XIX^e siècle.

Un demi-siècle de lents progrès

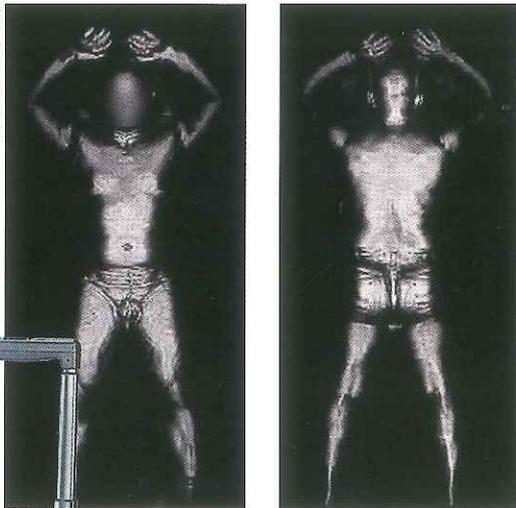
Cette gamme d'ondes a fait l'objet de travaux importants dans les années 1950 et 1960. L'un des verrous scientifiques a sauté avec la mise au point, à partir de la fin des années 1950, de la spectrométrie à transformée de Fourier. Cette méthode de mesure des fréquences d'un rayonnement et de leurs intensités relatives consiste à dédoubler le rayonnement en deux ondes, à faire interférer celles-ci en faisant varier leur différence de trajet, à enregistrer l'interférogramme et à en déduire, par une opération mathématique (la transformée de Fourier), les fréquences qui composent le signal.

Parallèlement, les développements de l'astronomie dans le domaine des ondes millimétriques, et la compétition qui s'en est suivie, ont contribué au progrès des techniques térahertz du côté de la microélectronique. Et, au début des années 1990, un bouleversement technique est survenu: des «lasers femtosecondes» délivrant des impulsions lumineuses de durée inférieure à la picoseconde (10^{-12} seconde). Fiables et performantes, ces sources de photons se sont démocratisées et ont permis à nombre de laboratoires non spécialisés en optique de s'équiper, puis d'approfondir leurs connaissances sur les phénomènes ultrarapides.

Or, dès la fin des années 1980, aux États-Unis, plusieurs physiciens ont compris l'intérêt des impulsions laser ultrabrèves pour créer des rayons dans l'infrarouge lointain. L'idée sous-jacente est qu'une impulsion lumineuse équivaut à la superposition d'un grand nombre d'ondes sinusoïdales de fréquences différentes, et que l'étendue de ce spectre est inversement proportionnelle à la durée de l'impulsion. Ainsi, avec une impulsion optique dont la durée est de l'ordre de la picoseconde ou moins, on atteint le domaine térahertz.

On peut par exemple focaliser une telle impulsion sur un cristal aux propriétés optiques particulières et récupérer, grâce à des effets d'optique non linéaire, une impulsion térahertz. On sait aussi produire des ondes térahertz par des procédés strictement électroniques. Les progrès les plus récents portent sur certains lasers à semi-conducteurs, les lasers dits à cascade quantique mis au point dans les années 1990. L'idée date des années 1970, mais il a fallu plus de 20 ans pour élaborer des composants efficaces. Grâce à leur

L-3 Communications Corp.



LES SCANNERS CORPORELS qui équipent certains aéroports utilisent le plus souvent des rayons X de faible énergie. On leur préfère désormais des dispositifs à base d'ondes millimétriques (*ci-dessus*) ou d'ondes térahertz, de fréquence un peu supérieure (*ci-contre*). Ces ondes traversent les vêtements, mais pas le corps. Des détails anatomiques intimes deviennent visibles, ce qui impose des procédures de protection de la vie privée telles que le floutage des visages.

illustrer.fr

petite taille (le composant actif a les dimensions d'une tête d'épingle), leur fiabilité et leur facilité d'emploi, les lasers à cascade quantique accélèrent l'emploi des ondes térahertz.

Le laser à cascade quantique

Le milieu actif d'un laser à cascade quantique est un empilement de couches ultraminces de matériaux semi-conducteurs. Ces couches, alternées, forment une succession de puits de potentiel quantiques, où les électrons sont confinés avec une énergie qui ne peut prendre que certaines valeurs précises. En appliquant une tension électrique extérieure, on obtient une structure d'énergie potentielle en escalier, les niveaux d'énergie des électrons étant espacés, d'un puits à l'autre, d'une même valeur. Un électron peut passer d'un puits à un autre par effet tunnel : il émet alors un photon, dont l'énergie (et la fréquence) correspond à l'écart d'énergie séparant deux puits consécutifs.

Ainsi, dans un laser à cascade quantique, les électrons descendent d'un puits à l'autre en cascade, en émettant un photon à chaque marche de potentiel franchie. En 1994, la première démonstration du laser à cascade quantique a eu lieu dans l'infrarouge moyen (longueur d'onde de 4,2 micromètres, soit une fréquence de plus de 70 térahertz). Depuis, les performances de ce type de sources, qui délivrent un faisceau continu et non des impulsions, se sont améliorées; elles se sont étendues jusqu'aux longueurs d'onde submillimétriques (68 micromètres, ou 4,4 térahertz), c'est-à-dire dans la partie supérieure du spectre térahertz.

Grâce à la maîtrise des procédés de fabrication des semi-conducteurs, par des techniques de croissance cristalline, le laser à cascade quantique «grignote» peu à peu la bande de fréquences térahertz, en associant faible dimension, faible consommation et performance. Pour une fréquence donnée, un laser à cascade quantique émet 1 000 fois plus de photons térahertz que toute autre technique. Seuls de très gros lasers

de laboratoire, inadaptés au secteur industriel, concurrencent ce composant.

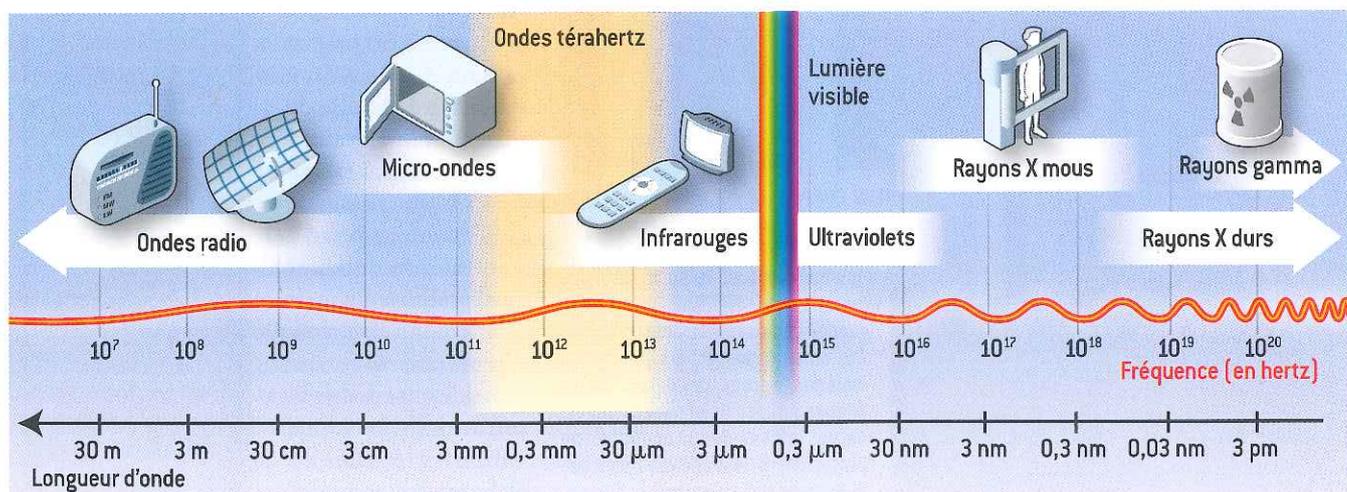
Un ennemi important du laser à cascade quantique est l'agitation thermique. En effet, les petits sauts qu'effectue un électron pour descendre les marches d'escalier de la structure en cascade sont plus petits que les «sauts en hauteur» que lui autorise l'énergie de l'agitation thermique. Aussi, pour éviter ces sauts inopinés, le dispositif doit opérer à des températures très basses. L'un des défis, relevé en 2008, est donc de mettre au point des lasers à cascade quantique fonctionnant à des températures supérieures à celle de l'azote liquide (-196°C).

On distingue deux familles de détecteurs des rayons térahertz, les cohérents et les incohérents. Les premiers sont des dispositifs électroniques qui restituent la mesure du signal électromagnétique en fonction du temps. Ils accèdent directement à la valeur du champ électromagnétique rayonné et cela pour des périodes temporelles de l'ordre de 10^{-12} seconde. Le capteur fonctionne comme une résistance: le champ électromagnétique de l'onde crée dans le circuit un courant de très faible intensité (de l'ordre de quelques picoampères, c'est-à-dire 10^{-12} ampère) que l'on mesure. Les détecteurs térahertz incohérents, plus simples, absorbent l'énergie du rayonnement incident et la convertissent en chaleur, qui est mesurée.

Traverser le bois et le béton

Voyons maintenant les applications de la technologie térahertz. Elles sont liées aux propriétés des ondes térahertz. Ces ondes combinent les avantages des ondes optiques et des ondes radio ou millimétriques. Avec les premières, elles partagent la directivité, c'est-à-dire qu'il est possible de réaliser des dispositifs de taille supérieure à la longueur d'onde afin de les orienter ou les focaliser vers un point donné. Comme les secondes, les ondes térahertz autorisent l'emploi de techniques d'émission et de détection par des antennes; mais, surtout, elles

LES ONDES TÉRAHERTZ sont intermédiaires entre les micro-ondes et les rayons infrarouges. Elles correspondent à une gamme de fréquence comprise entre environ 0,1 et 10 térahertz. En termes de longueur d'onde, ce domaine va de quelques dizaines de micromètres pour les plus hautes fréquences à deux ou trois millimètres pour les plus basses.



Bruno Bourgeois

peuvent pénétrer bien plus profondément là où les ondes optiques sont absorbées ou réfléchies.

Par exemple, les ondes térahertz traversent des parois de bois et de béton de plusieurs centimètres d'épaisseur. Dès lors, on peut « voir » derrière une surface ou à l'intérieur d'un volume opaque aux rayons optiques. Ainsi, la NASA inspecte la présence de trous dans les mousses de protection de certaines pièces de la navette (les réservoirs de combustible) à l'aide d'appareils d'imagerie térahertz.

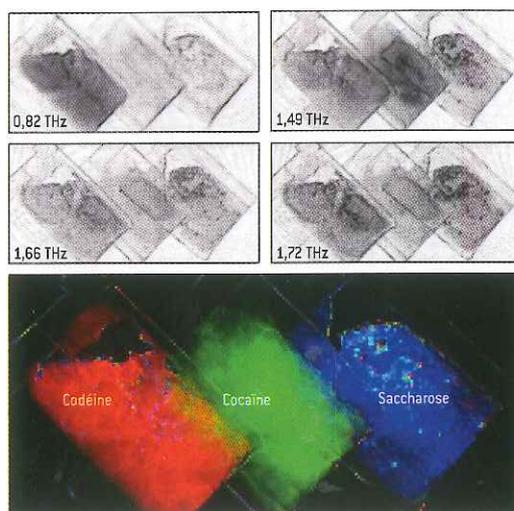
Le pouvoir pénétrant des rayons térahertz offre bien d'autres possibilités. Outre les scanners corporels, pour les domaines de la sécurité et de la lutte antiterroriste, on peut aussi regarder une vis fixée dans une planche de bois, la poudre contenue dans une gélule, un produit alimentaire dans son emballage, etc. De telles possibilités intéressent le contrôle de qualité dans nombre de secteurs, agroalimentaire et pharmaceutique notamment.

Détecter drogues et explosifs

Une utilisation complémentaire des rayons térahertz est possible avec de la spectroscopie, c'est-à-dire en analysant le pouvoir d'absorption, de réflexion ou de transmission d'un matériau selon la fréquence des ondes. On est aujourd'hui capable de mesurer, sur des matériaux diélectriques (isolants sur le plan électrique), ces propriétés à des fréquences comprises entre 0,1 et 4 térahertz sans contact et presque en temps réel, pour toutes les fréquences à la fois. Un tel spectre térahertz caractérise physico-chimiquement la substance examinée.

En combinant imagerie et spectroscopie, on peut obtenir une série d'images du même objet, mais prises à plusieurs dizaines de longueurs d'onde différentes – qui correspondent à autant de « couleurs ». Avec une telle spectro-imagerie, certains appareils sont par exemple capables de caractériser le pouvoir explosif d'un liquide contenu dans une bouteille. On peut détecter des substances dangereuses ou illicites dans le courrier : au Japon, certains centres de tri postal sont équipés d'un appareil térahertz qui, à travers les enveloppes, analyse et identifie des produits douteux, sans contact ni ouverture. Certains systèmes térahertz réalisent des images et détectent des drogues ou des explosifs, à plusieurs mètres de distance, de façon passive, c'est-à-dire en n'utilisant que le rayonnement ambiant comme source d'ondes térahertz.

Les possibilités offertes par le rayonnement térahertz sont nombreuses et alléchantes. Toutefois, il ne faut pas oublier que ces ondes souffrent de quelques inconvénients. L'un d'eux est la faible résolution spatiale, due aux lois de la diffraction et à la longueur d'onde relativement élevée du rayonnement térahertz. Une autre limitation des rayons térahertz est qu'ils sont totalement absorbés par les matériaux constitués de molécules polaires, l'eau en



Adrian Dobrou et Koto Kawase, RIKEN, Japon

particulier, et par les bons conducteurs électriques, tels les métaux. C'est pourquoi en biologie et en médecine, l'emploi des ondes térahertz se limite aux régions superficielles, telle la peau sur une profondeur d'une fraction de millimètre, ou aux parties « sèches », comme les dents.

La technologie térahertz est-elle une technologie du troisième millénaire ou n'est-elle qu'un phénomène de mode ? Le développement des lasers femto-secondes et des composants semi-conducteurs a rendu possible, vers le milieu des années 1980, un essor rapide des techniques de production d'impulsions térahertz et de détection. Du côté des sources de rayonnement, un grand pas a été franchi plus récemment avec les lasers térahertz à cascade quantique. Ces émetteurs compacts et peu gourmands en énergie sont de plus en plus efficaces, et plusieurs jeunes entreprises en commercialisent, avec une offre en fréquence qui s'étend de l'infrarouge jusqu'au térahertz. On peut espérer, pour le laser térahertz, le même essor qu'ont connu dans les années 1980 les diodes à semi-conducteur, aujourd'hui omniprésentes dans l'électronique.

La liste des applications ne cesse de s'allonger et l'on est à un moment où les laboratoires spécialisés travaillent en synergie avec les entreprises afin de définir et concevoir les outils dont celles-ci ont besoin.

La dernière étape, celle des applications de masse, dépend principalement de la miniaturisation des systèmes et de la diminution des coûts de fabrication ; cela conditionne leur accessibilité aux petites et moyennes entreprises. De nombreuses équipes portent leurs efforts sur le développement de systèmes térahertz compacts et de techniques tomographiques (imagerie en trois dimensions, réalisée en balayant l'objet par tranches), ainsi que sur la diminution des temps d'acquisition des images. La mise au point d'une caméra compacte constituera sans doute le prochain saut de la technologie térahertz. L'ère du térahertz est imminente. ■

UNE IMAGERIE TÉRAHERTZ créée avec plusieurs fréquences de rayonnement révèle la nature physico-chimique de certaines substances, notamment des drogues et des explosifs. D'une série d'images de trois sachets (codéine, cocaïne et saccharose) prises à diverses fréquences (quatre sont montrées), on déduit la nature du contenu (en haut). Des techniques produisent des images en fausses couleurs (en bas).

livres

• J.-L. COUTAZ (sous la direction de), *Optoélectronique térahertz*, EDP-Sciences, 2008.

articles

• M. A. BELKIN et al., *High-temperature operation of terahertz quantum cascade laser sources*, in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15(3), pp. 952-967, 2009.

• S. KUMAR et al., *186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design*, in *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, 131105, 2009.

• P. MOUNAIX, *Sous l'œil des rayons T*, in *Pour la Science*, n° 338, décembre 2005.

• J.-M. COURTY et É. KIERLIK, *Pas de pudeur avec les rayons T1*, in *Pour la Science*, n° 329, mars 2005.

Le rayonnement synchrotron : un outil de pointe pour la science sous conditions extrêmes de pression et de température

Mohamed Mezouar⁽¹⁾ (mezouar@esrf.fr), Agnès Dewaele⁽²⁾, Nicolas Guignot⁽³⁾ et Paul Loubeyre⁽²⁾

(1) European Synchrotron Radiation Facility, BP 220, 38043 Grenoble Cedex 9

(2) CEA / DAM Île-de-France, Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon Cedex

(3) Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, 91192 Gif-sur-Yvette

Le rayonnement X intense des sources synchrotrons modernes s'est imposé comme un outil incontournable pour les études *in situ* sous conditions extrêmes de pression et de température.

Deux études récentes ont été sélectionnées pour illustrer le potentiel de ce type d'expérience. Le premier exemple réside dans la détermination précise de la courbe de fusion du tantale par diffraction X. Le second exemple concerne l'étude de la densité du magma lunaire par absorption X ; ces mesures permettent d'expliquer simplement l'absence d'activité volcanique à la surface de la Lune.

Les études *in situ* par diffusion ou absorption de rayons X sous conditions extrêmes de pression et de température sont très délicates, en raison de la nécessité de travailler sur des échantillons de très faible volume (typiquement de l'ordre de 10^{-6} mm³ pour une pression de 100 GPa) et du caractère fortement absorbant des enceintes hautes pressions. Ceci explique l'émergence tardive de ce champ de recherche, pour lequel l'utilisation de sources conventionnelles de rayons X (anode tournante) est très limitée. Dès l'apparition des sources intenses, de haute énergie ($E > 30$ keV) et faiblement divergentes, de rayons X que sont les synchrotrons dits « de troisième génération », des progrès remarquables ont été réalisés dans ce domaine de recherche. Cela tient aux propriétés exceptionnelles de ces sources, qui permettent de sonder précisément la matière confinée à l'extrême dans des cavités à très hautes pressions.

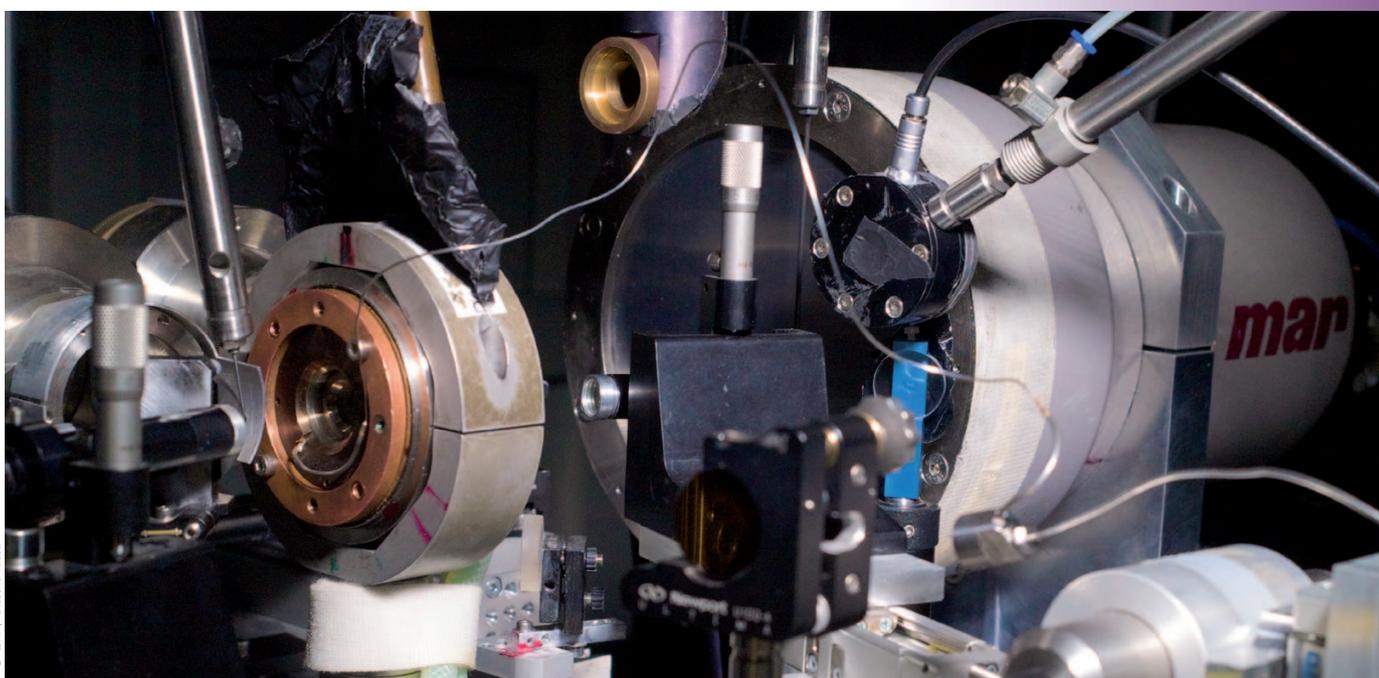
Parallèlement, la technologie des hautes pressions a évolué de façon remarquable et a fourni des outils parfaitement adaptés à ces nouvelles sources de rayons X. Des découvertes spectaculaires ont été réalisées dans des domaines aussi variés que les sciences de la Terre, la physique, la chimie ou la biologie. On peut, par exemple, citer la découverte par diffraction de rayons X de la transition de phase de la pérovskite vers la phase postpérovskite, qui explique les anomalies sismiques observées à la base du manteau inférieur de la Terre [1].

Un autre exemple marquant est la synthèse *in situ* sous haute pression et haute température du composé BC₂N de structure cubique, et dont les propriétés mécaniques sont proches de celles du diamant [2].

On peut également noter la diversité des techniques X qui ont émergé au cours des deux dernières décennies. La diffraction, la diffusion inélastique, l'absorption, la diffusion Mössbauer sont autant de techniques utilisant les rayons X, qui permettent l'étude détaillée des propriétés électroniques, magnétiques et structurales des matériaux sous conditions extrêmes.

Deux exemples de travaux récents ont été sélectionnés ici, afin d'illustrer le potentiel de ce type d'expérience. L'étude de la courbe de fusion du tantale en cellule à enclumes de diamant chauffées par laser a constitué un véritable défi expérimental et théorique et met fin à une longue controverse. Le second exemple est issu des sciences de la Terre et de l'Univers où, grâce à des mesures de densité en presse « Paris-Édimbourg », il est proposé un scénario plausible pour expliquer l'absence de volcanisme actif à la surface de la Lune.

À travers ces deux exemples, on pourra évaluer l'intérêt des expériences *in situ* sous hautes pressions et températures au synchrotron. Ces méthodes, par essence multidisciplinaires, sont porteuses de découvertes importantes.



© ESRF / Bascha Faust

Le dispositif expérimental sur la ligne de lumière ID27 de l'ESRF, où les expériences de diffraction sont effectuées. La cellule à enclumes de diamant est à l'intérieur du cylindre de laiton au centre.

Mesure de la courbe de fusion du tantale en cellule à enclumes de diamant chauffée par laser

Dès son invention dans les années cinquante, la cellule à enclumes de diamant (CED) s'est imposée comme l'outil incontournable pour l'étude des matériaux sous hautes pressions statiques. En raison de ses propriétés physico-chimiques exceptionnelles (très grande dureté, transparence dans une large gamme de longueur d'onde, très bonne conductivité thermique), le diamant est apparu comme le matériau de confinement idéal pour les études *in situ* sous hautes pressions. La cellule à enclumes de diamant est un petit dispositif qui pèse environ 200 grammes et qui peut générer des pressions énormes équivalentes, voire même supérieures, à celle qui règne au centre de la Terre (350 GPa ou 3,5 millions d'atmosphères). De plus, en raison de ses qualités optiques dans le domaine des rayons X, la CED est particulièrement bien adaptée aux études structurales sous hautes pressions par diffraction de rayons X. Dans ce contexte et en raison de la faible quantité de matière étudiée (quelques microgrammes), les sources de rayons X synchrotrons de troisième génération du type ESRF ont joué un rôle fondamental.

Une autre propriété fondamentale du diamant est sa transparence dans le domaine infrarouge, qui permet le

chauffage de l'échantillon par absorption de rayonnement laser YAG ou CO₂ de forte puissance. Ce système peut générer des températures supérieures à 5000 kelvins et est très bien adapté à l'étude de la courbe de fusion des métaux, dont un exemple est présenté ici.

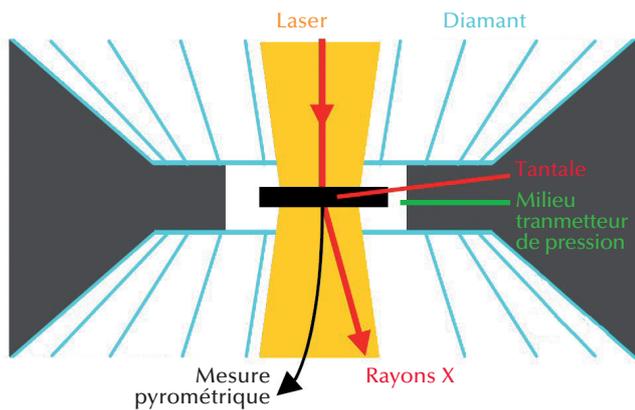
Au cours des dix dernières années, de nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été consacrés à l'étude de la courbe de fusion des métaux sous haute pression. Cependant, la fusion reste une transition de phase difficile à prédire et modéliser, car elle a lieu à haute température, quand le système est éloigné de son état fondamental (à $T = 0$ K), seul état prédit de façon fiable par les calculs *ab initio*. Sa caractérisation expérimentale est également difficile, car il s'agit de créer et de mesurer des conditions extrêmes de pression (plusieurs millions d'atmosphères) et de température (plusieurs milliers de kelvins) et, dans le même temps, d'atteindre et de caractériser l'état d'équilibre du système.

Le cas du tantale est exemplaire des efforts, des problèmes et des controverses dans la détermination de la courbe de fusion des éléments [3]. Jusque récemment, les températures de fusion mesurées pour le tantale différaient de plusieurs milliers de kelvins dans le domaine 100-300 GPa (1-3 millions d'atmosphères). En utilisant la compression

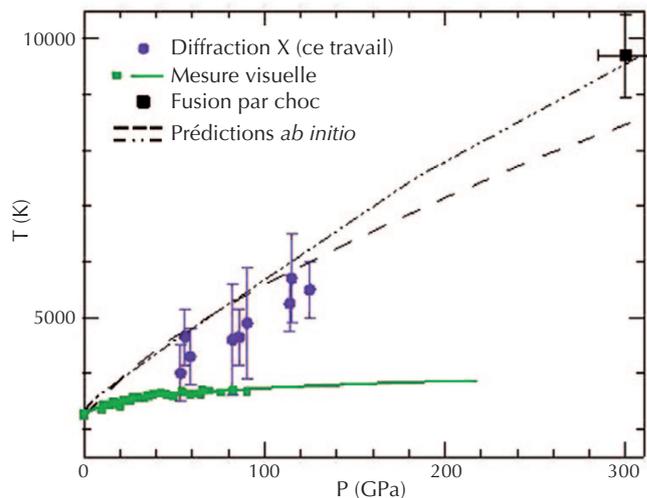
par un choc dû à l'impact d'un projectile sur l'échantillon, un point de fusion à environ 9700 K à 300 GPa avait été obtenu. Mais en utilisant des cellules à enclumes de diamant chauffées par laser (CEDL), où l'échantillon comprimé entre deux diamants est chauffé par un laser infrarouge focalisé, une équipe allemande a observé visuellement des points de fusion atteignant seulement 3730 K à 100 GPa [4]. Ces mesures étaient non seulement en désaccord avec les mesures par choc, mais aussi avec des prédictions théoriques pour lesquelles l'effet de la pression sur la température de fusion, dT/dP , devait être environ quatre fois plus important [5]. Il a été proposé que le changement observé en CEDL n'était pas la fusion, mais du polymorphisme [5] ou un changement des propriétés mécaniques [6].

Nous avons utilisé un nouveau diagnostic de fusion, basé sur la diffraction de rayons X en CEDL, pour étudier la fusion du tantale. Le phénomène de fusion s'accompagne d'une perte d'ordre à longue distance dans le matériau. Cette perte d'ordre se manifeste dans le diagramme de diffraction par la disparition des pics de Bragg et par l'apparition concomitante d'un halo diffus. L'apparition de ce halo diffus, utilisé comme critère de fusion, a été validé pour le plomb [7]. Le faisceau de rayons X synchrotron et les lasers sont focalisés sur un même point de l'échantillon, dont la température est

»»»



1. Schéma de la chambre de pression dans la cellule à enclumes de diamant chauffée par un faisceau laser (en jaune). Différents milieux transmetteurs de pression (sels, gaz rares, oxydes) ont été utilisés. L'échantillon est contenu dans une cavité cylindrique de 100 microns de diamètre.



2. Courbe de fusion du tantale déterminée par différentes méthodes. À pression nulle, la température de fusion du tantale est de 3290 K.

>>>

mesurée par pyrométrie (fig. 1). L'échantillon est entouré d'un milieu transmetteur de pression, déformable, qui permet d'obtenir des conditions de pression quasi hydrostatiques, et ce malgré la géométrie uniaxiale de la CEDL. La diffraction de rayons X permet de distinguer la fusion du polymorphisme, parce que ce dernier se traduit par l'apparition de nouvelles raies de Bragg ; elle détecte aussi d'éventuelles réactions chimiques de l'échantillon avec son environnement au cours de la chauffe. La mesure de la dilatation thermique déduite du déplacement des raies de Bragg avec la température permet de confirmer la mesure pyrométrique.

Nos expériences ont montré qu'à haute température, le carbone, dont sont composées les enclumes de diamant de la CEDL, diffuse à travers le milieu transmetteur de pression et réagit avec le tantale pour former un carbure. Cette réaction chimique perturbe fortement l'observation de changements structuraux dans l'échantillon lors de sa chauffe. Nous avons aussi observé que la fusion du milieu transmetteur de pression peut modifier ses propriétés optiques et donc affecter les mesures pyrométriques. Ceci est un réel problème pour le tantale qui est très réfractaire, et pour lequel il est impossible de trouver un milieu transmetteur de pression qui ne fonde pas en premier. Ces difficultés peuvent expliquer les températures de fusion anormalement basses mesurées en CEDL visuellement [4].

Les mesures pyrométriques, validées par celles de dilatation thermique de l'échantillon, montrent que la température de fusion du tantale, 5500 ± 500 K à 125 GPa, est bien plus élevée que ce qui avait été mesuré précédemment en CEDL. Jusqu'à ce point, le tantale ne subit aucune transformation polymorphique. La figure 2 montre que la courbe de fusion mesurée par diffraction de rayons X en CEDL se rapproche de la mesure par choc et est en bon accord avec les prédictions théoriques [5].

Nous pensons que cette étude a établi de nouveaux standards pour les études de physique en CED. Ces standards pourront en particulier être appliqués à l'étude du diagramme de phase du fer sous très haute pression, dont la connaissance précise est de première importance pour mieux appréhender les propriétés physico-chimiques du noyau terrestre.

Étude du volcanisme lunaire en presse « Paris-Édimbourg »

La presse Paris-Édimbourg est le fruit d'une collaboration entre deux équipes, issues de l'Université P. et M. Curie et de l'Université d'Édimbourg [8]. Ce dispositif, dont une photo est présentée sur la figure 3, a été initialement conçu pour les études *in situ* par diffusion de neutrons. Il s'est révélé très adapté aux mesures de diffraction et d'absorption X sous rayonnement synchrotron. Il permet l'étude structurale détaillée des solides et

des liquides dans une large gamme de pressions et de températures ($P < 15$ GPa et $300 < T < 2500$ K). Ce dispositif présente l'avantage de pouvoir utiliser de plus gros échantillons (quelques millimètres cubes de matière) que la CED, au prix d'un domaine de pression accessible très inférieur à celui de la CED. Cet avantage est décisif, car il permet également d'insérer au sein de la cavité haute pression un micro-four résistif qui, contrairement à la CEDL, génère des conditions homogènes de température dans tout le volume de l'échantillon. Ce dernier point est crucial pour la mesure précise de la dépendance en pression et température de la densité d'un matériau.

L'exemple présenté ici est une étude récente, réalisée par une équipe de l'Université d'Amsterdam sur la ligne de lumière ID27 à l'ESRF. Elle a permis de résoudre l'énigme de l'absence de volcanisme actif à la surface de la Lune et a été publiée dans la revue *Nature Geoscience* [9].

Contrairement à la Terre, notre Lune n'a pas de volcanisme actif, et les traces de son activité passée datent de plusieurs milliards d'années. Pourtant, des données sismiques récentes suggèrent la présence d'une grande quantité de magma liquide à l'intérieur du satellite de la Terre. Cette proposition est confortée par les missions Apollo, qui ont permis de ramener sur Terre des échantillons de sols lunaires. L'analyse de ces échantillons représentatifs du manteau lunaire a en effet

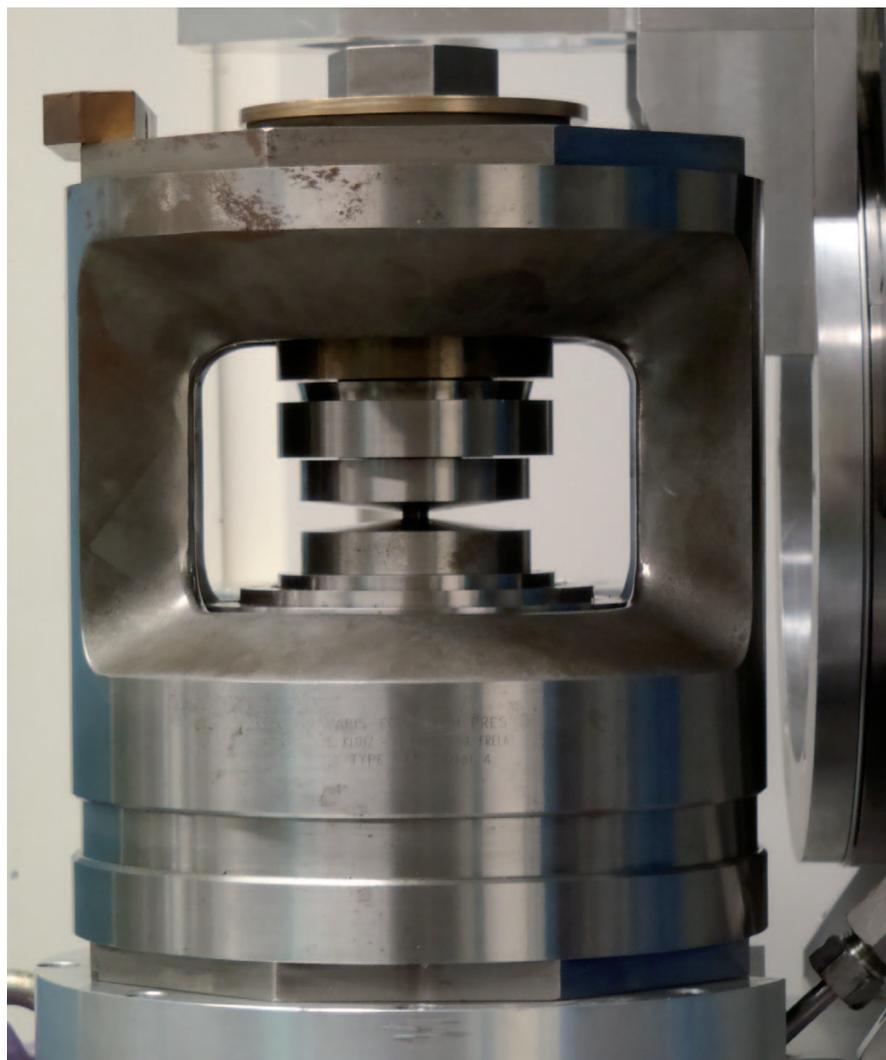
montré la présence de gouttelettes de verre volcanique riche en titane, provenant de véritables fontaines de lave, actives il y a plus de 3,5 milliards d'années.

Les expériences « terrestres » se sont déroulées en plusieurs étapes. En raison du caractère destructif des expériences à haute pression, il a tout d'abord fallu recréer en laboratoire des roches microscopiques du manteau lunaire. Il s'agissait de synthétiser des « copies » de celles ramenées sur Terre lors des missions Apollo. Ces roches présentent une teneur en titane plus élevée que celles du manteau terrestre.

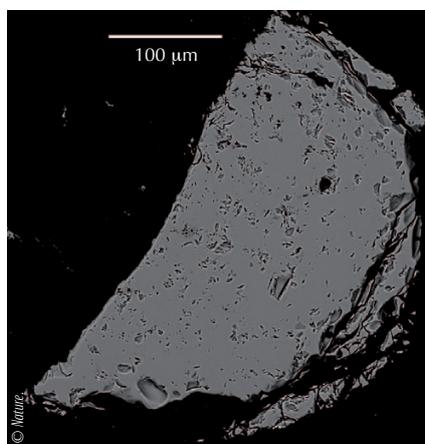
La seconde étape a consisté à porter ces échantillons à des températures et des conditions de pression similaires à celles régnant dans le manteau lunaire, puis de mesurer leur densité par absorption de rayons X, la diffraction X permettant de s'assurer de la fusion de la totalité du matériau confiné. Les échantillons ont été placés dans une enceinte de confinement en bore-époxy au centre de la presse Paris-Édimbourg (fig. 3) et ont été chauffés à l'aide d'un microfour en graphite de haute résistivité. Le mélange bore-époxy a le double avantage d'être isolant électrique et transparent aux rayons X de haute énergie ($E > 30 \text{ keV}$). De cette façon, il a été possible de simuler les conditions régnant dans le manteau profond de la Lune, c'est-à-dire des températures de 1800 kelvins et des pressions de 45 000 atmosphères.

Une image par microsonde électronique d'un échantillon récupéré aux conditions ambiantes après compression à 10 000 atmosphères et chauffage à 1854 kelvins, est présentée figure 4.

D'après les mesures de densité et les simulations numériques, il semble désormais établi que le manteau lunaire profond, même s'il est partiellement fondu, est trop dense en raison de son enrichissement en titane, pour que des panaches de matière fondue remontent en surface sous l'effet de la pression d'Archimède. Toutefois, la Lune n'ayant pas encore achevé son refroidissement et en raison de l'appauvrissement en titane du liquide par cristallisation partielle, il devrait arriver un moment dans son histoire où les conditions physico-chimiques dans le manteau lunaire devraient être telles que du magma pourrait remonter en surface. ■



3. Photographie de la presse Paris-Édimbourg. Le joint en bore-époxy contenant l'échantillon se situe entre deux enclumes en carbure de tungstène au centre de la presse.



4. Image par microsonde électronique d'une copie d'échantillon de roche lunaire, après expérience aux rayons X.

Références

- 1• M. Murakami *et al.*, *Science* **304** (2004) 855.
- 2• V.L. Solozhenko, D. Andrault, G. Fiquet, M. Mezouar, *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 1385-1387.
- 3• A. Dewaele, M. Mezouar, N. Guignot et P. Loubeyre, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 255701.
- 4• D. Errandonea *et al.*, *Phys. Rev. B* **63** (2001) 132104.
- 5• L. Burakovsky *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 255702.
- 6• C. J. Wu *et al.*, *Nature Mater.* **8** (2009) 223.
- 7• A. Dewaele, M. Mezouar, N. Guignot et P. Loubeyre, *Phys. Rev. B* **73** (2007) 144106.
- 8• J. M. Besson, R. J. Nelmes, G. Hamel, J. S. Loveday, G. Weill et S. Hull, *Physica B* **180 & 181** (1992) 907.
- 9• M. van Kan Parker *et al.*, *Nat. Geo.* **5** (2012) 186.

Ces puces qui miment les neurones naturels

Grâce à des composants électroniques bio-inspirés, les chercheurs mettent en avant de nouveaux modèles pour pousser plus loin les applications en intelligence artificielle.

En septembre 2017, un neurone artificiel capable de reconnaître des chiffres prononcés par différentes personnes a fait l'objet d'une présentation très remarquée. À l'heure des assistants intelligents de type Google Home et de la voiture autonome, pourquoi une performance aussi sommaire fut-elle annoncée comme une première mondiale par la célèbre revue *Nature*¹ ? Parce que la révolution réside dans le composant lui-même : un neurone électronique, cylindre de métal mille fois plus fin qu'un cheveu et implémentable en circuit. Bref, un nano-neurone artificiel « en dur », à la différence des réseaux de

neurones virtuels qui, s'ils permettent actuellement de spectaculaires applications en intelligence artificielle (IA), désignent en réalité des fonctions mathématiques, des algorithmes, purement numériques et impalpables.

« D'autres nano-neurones artificiels "en dur" avaient déjà été mis au point, mais nous avons été les premiers à les faire fonctionner au sein d'une application », explique Julie Grollier, qui a dirigé ces travaux au sein de l'Unité mixte de physique CNRS-Thales². Quelques mois plus tôt, en avril, un autre composant bio-inspiré était dévoilé dans *Nature Communications*³ par Vincent Garcia, chercheur au sein de la même unité, et ses collègues. Cette fois, il s'agissait d'une synapse artificielle, inspirée de celles qui relient les neurones du cerveau.

AlphaGo, fondé sur le *deep learning*, bat Lee Sedol, considéré comme l'un des meilleurs joueurs de go au monde.

2016

2017

Le premier neurone artificiel « en dur », composant électronique mis au point par une équipe dirigée par Julie Grollier, fonctionne au sein d'une application. Celle-ci permet de reconnaître des chiffres prononcés par différentes personnes (lire l'article ci-contre).

SYNAPSE
Zone de contact entre les neurones, assurant la transmission des informations.

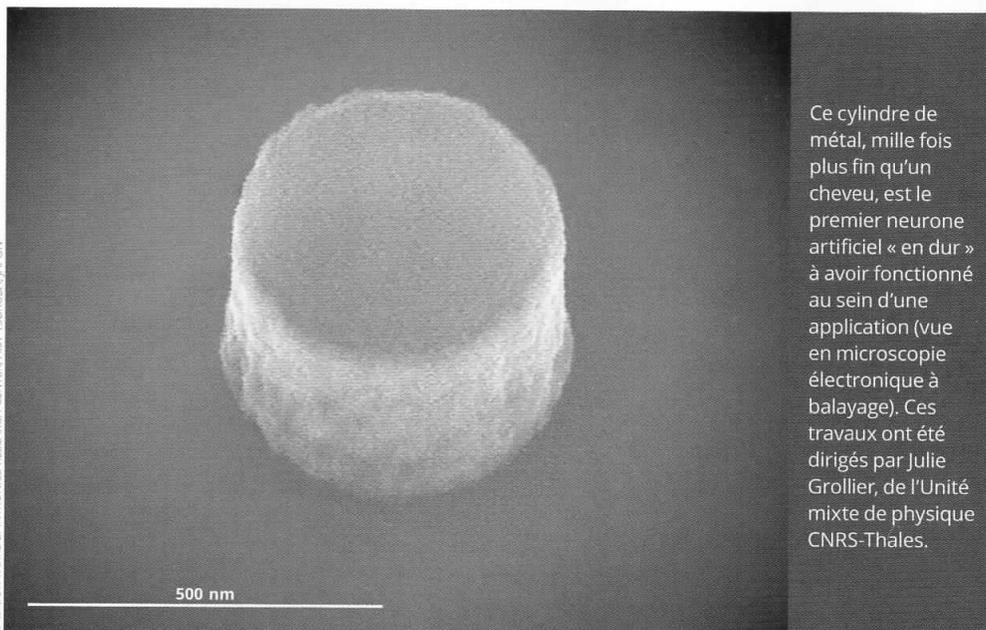
1. « Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators », J. Torrejon et al., *Nature*, 2017, vol. 547 : 428-431. 2. Unité CNRS/Thales/Université Paris-Sud. 3. « Learning through ferroelectric domain dynamics in solid-state synapses », S. Boyn et al., *Nature Communications*, 2017, vol. 8 : 14736.

... Une large économie d'énergie

À quoi bon cette nouvelle quincaillerie électronique alors que les réseaux de neurones virtuels font déjà merveille en intelligence artificielle ? Parce que ces derniers, redoutables pour classer de gigantesques masses de données, sont aussi effroyablement gourmands en énergie... Un gaspillage lié à la structure même des machines sur lesquelles ils turbinent.

« Les ordinateurs traditionnels sur lesquels on les fait tourner sont fondés sur une architecture datant des années 1950 qui sépare la mémoire et le "centre de calcul" en deux blocs bien distincts, explique Damien Querlioz, chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies⁴. Dès lors, un calcul, même simple, nécessite parfois d'aller chercher des données stockées très loin à l'échelle de la microélectronique. Or, les réseaux de neurones virtuels ont la particularité d'effectuer des calculs, certes très simples, mais en quantité massive et de manière parallèle avec souvent beaucoup de redondances. » D'où, parfois, de terribles « embouteillages » énergivores pour accéder à la mémoire... C'est ainsi que le programme AlphaGo, l'IA de Google qui a récemment écrasé les plus

Le programme AlphaGo, qui a écrasé les plus grands champions de go, consomme dix mille fois plus d'énergie qu'un humain à la même table de jeu !



Ce cylindre de métal, mille fois plus fin qu'un cheveu, est le premier neurone artificiel « en dur » à avoir fonctionné au sein d'une application (vue en microscopie électronique à balayage). Ces travaux ont été dirigés par Julie Grollier, de l'Unité mixte de physique CNRS-Thales.

grands champions de go, consomme dix mille fois plus d'énergie qu'un humain à la même table de jeu !

« Grâce à ses circuits neurone-synapse, notre cerveau, lui, dispose d'une mémoire ("stockée" dans les synapses) placée au plus proche du "centre de calcul" (que symbolisent les neurones) », explique Damien Querlioz. Cette architecture très distribuée s'avère extrêmement efficace pour traiter en parallèle la myriade d'opérations simples que nécessite la reconnaissance de sons ou d'images. En revanche, elle est moins adaptée au calcul classique : « Pour les opérations arithmétiques par exemple, qui font appel à moins de calculs, mais plus complexes, et exécutés les uns après les autres, l'architecture bien centralisée des ordinateurs traditionnels reste imbattable en précision », poursuit le chercheur.

Si l'on parvient à construire des puces neuromorphiques, assemblage de composants artificiels mimant neurones et synapses biologiques, elles seront donc dédiées uniquement aux tâches d'IA où les excellents quoique trop dispendieux réseaux de neurones actuels sont cantonnés (reconnaissance de formes, de sons, etc.). Et l'éventuel ordinateur du futur qui en abriterait garderait précieusement ses microprocesseurs classiques. « En

intégrant une puce neuromorphique, dédiée aux algorithmes de type réseau de neurones courants en IA, sur chaque processeur d'ordinateur ou de téléphone, on disposerait de processeurs moins énergivores », confirme Vincent Garcia.

Les géants de l'électronique ne s'y sont pas trompés : IBM, Intel, Qualcomm, tous développent leur propre puce neuromorphique. Leur approche peut sembler timide : neurones et synapses artificiels y sont construits à partir de transistors classiques en silicium. C'est également le parti pris d'Alain Cappy, de l'Institut de recherche sur les composants logiciels et matériels pour l'information et la communication avancée⁵.

« L'avantage de n'utiliser que des composants déjà existants est de pouvoir fabriquer plus rapidement des puces efficaces et industrialisables », argumente le chercheur. Ce qui ne le dispense pas de toute originalité : là où les neurones de silicium mis en œuvre par les industriels nécessitent vingt à trente transistors, l'équipe d'Alain Cappy a délibérément privilégié un modèle plus simple et économe de six transistors seulement. Résultat : « Il consomme cent fois moins d'énergie que les autres neurones artificiels du même type », se félicite Alain Cappy. Il fait également le pari d'une intégration totalement bio-inspirée : « L'idée

est d'imiter le système yeux-cortex cérébral qui analyse si rapidement et si efficacement l'image. Nous tentons ainsi d'intégrer ces neurones à la fois dans des capteurs visuels inspirés de la rétine biologique, et dans des puces de traitement agencées comme les colonnes de neurones de notre cortex cérébral », poursuit Alain Cappy. Cette architecture très interconnectée pourrait s'avérer efficace pour mettre en place des réseaux de neurones bien plus complexes et performants que les possibilités offertes par les solutions actuelles sous forme logicielle.

L'assemblage des neurones

La plupart des chercheurs misent sur une approche encore plus révolutionnaire pour fabriquer les composants bio-inspirés eux-mêmes. « Les neurones construits avec des transistors classiques mesurent

100 micromètres de côté tandis que le nôtre mesure à peine 100 nanomètres de diamètre : c'est mille fois plus petit », se réjouit Julie Grollier. Or, la question de la taille se posera de manière aiguë quand on voudra les assembler par millions et fabriquer des puces valables. Pour construire leur nano-neurone, les chercheurs de l'Unité mixte de physique CNRS-Thales ont misé sur la spintronique, une discipline utilisant le spin des électrons comme unité d'information (alors que l'électronique utilise la charge électrique des électrons).

On peut ainsi se représenter, de manière schématique, un électron comme un petit aimant pouvant prendre seulement deux orientations : un spin « vers le haut » ou un spin « vers le bas ». Le nano-neurone consiste en un empilement de deux couches de métaux ferromagnétiques prenant en sandwich une

EFFET TUNNEL

Effet quantique permettant à une particule de traverser une barrière a priori infranchissable.

SPIN

Caractéristique microscopique et purement quantique de l'électron, comparable à une aimantation.

ISOLANT DE MOTT

Matériau isolant du fait d'une forte interaction répulsive entre électrons.

fine couche d'isolant électrique. « Lorsqu'on le soumet à un courant continu, les électrons passent à travers l'isolant par effet tunnel et leur spin fait tourner l'aimantation de la couche supérieure. Cela produit en sortie des oscillations électriques comparables aux signaux émis par les neurones de notre cerveau », résume Julie Grollier.

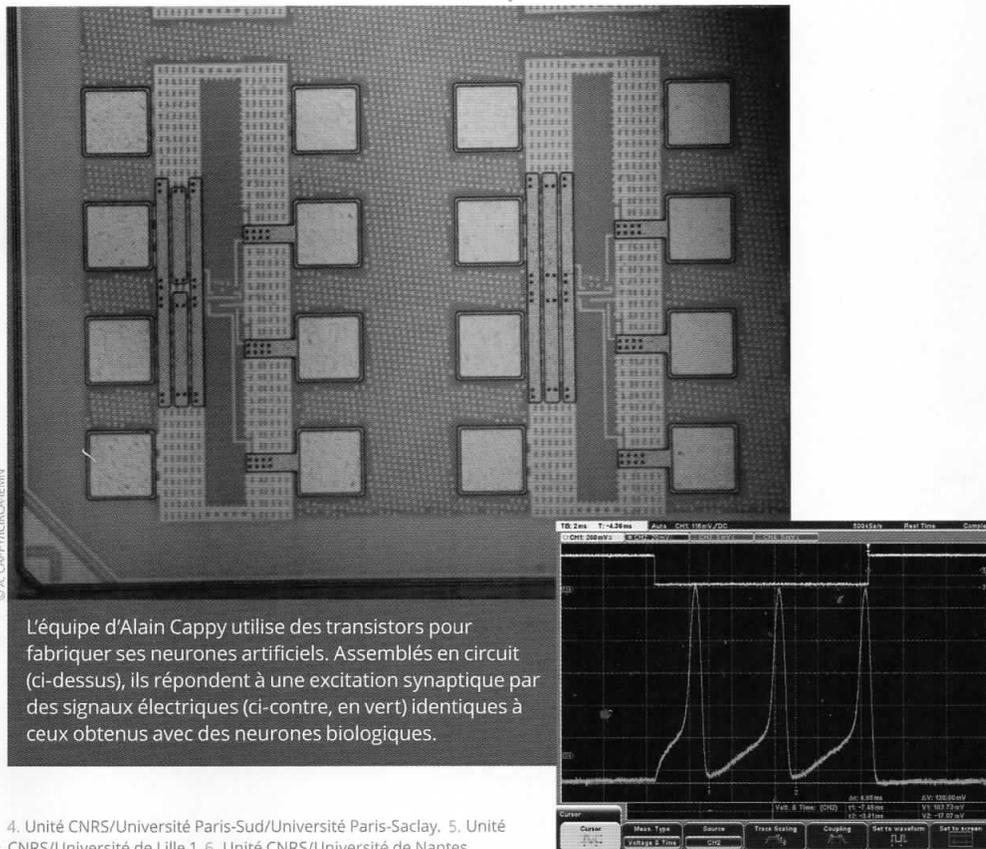
Pour développer leur propre nano-neurone, l'équipe de Laurent Cario, de l'Institut des matériaux Jean-Rouxel⁶, a de son côté misé sur les isolants de Mott. Ce matériau, dont le comportement physique est exploré dans le cadre de mémoires de nouvelles générations, pourrait constituer une alternative aux matériaux spintroniques : « Notre neurone a fait l'objet d'un brevet déposé en 2014 et nous essayons maintenant d'en améliorer la miniaturisation afin de faciliter son transfert industriel », indique Laurent Cario.

Imiter la plasticité biologique

Présentes dans le cerveau en nombre dix mille fois plus important que les neurones, les synapses ont un rôle tout aussi capital. En particulier, les chercheurs tentent de reproduire une caractéristique de ces canaux interneuroniques : leur plasticité, c'est-à-dire leur capacité à se renforcer ou à se déprécier au fil du temps pour favoriser le « câblage » entre les neurones utiles.

Pour y parvenir, Vincent Garcia et son équipe ont choisi une couche ultra-mince d'un matériau ferroélectrique que les électrons traversent par effet tunnel : « Nous avons démontré que l'amplitude et la durée des impulsions que reçoit la synapse artificielle provoquent une variation de la résistance du matériau, donc de sa capacité à transmettre le courant tunnel. Cette propriété est très similaire à la plasticité des synapses biologiques », détaille le chercheur.

« De nombreux matériaux peuvent, sur application de certaines ...



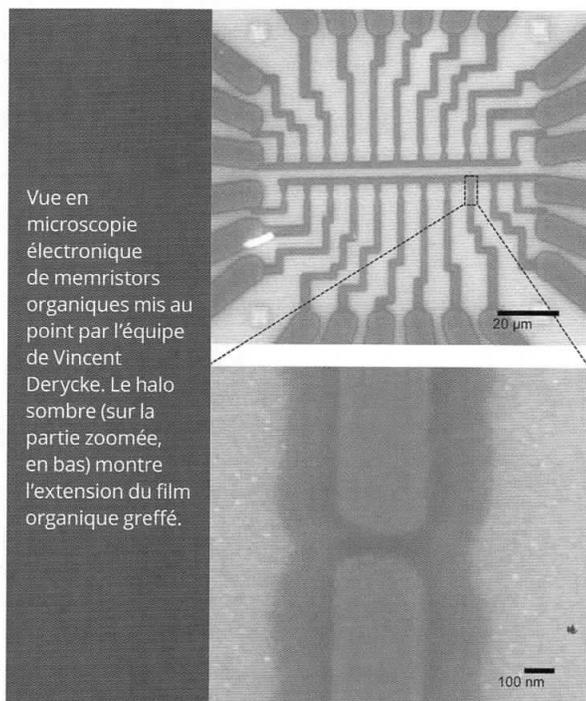
L'équipe d'Alain Cappy utilise des transistors pour fabriquer ses neurones artificiels. Assemblés en circuit (ci-dessus), ils répondent à une excitation synaptique par des signaux électriques (ci-contre, en vert) identiques à ceux obtenus avec des neurones biologiques.

4. Unité CNRS/Université Paris-Sud/Université Paris-Saclay. 5. Unité CNRS/Université de Lille 1. 6. Unité CNRS/Université de Nantes.

“Un composant seul peut présenter un comportement physique remarquable qui s'estompe lorsqu'on en intègre des milliers.”

... gammes de tensions, présenter ce type de propriétés de changement de résistivité », remarque Vincent Derycke, chercheur au sein du laboratoire Nimbe⁷. Oxydes de métal, matériaux spintroniques, ferroélectriques..., la palette de candidats « exotiques » (c'est-à-dire marginaux par rapport à ceux utilisés en microélectronique classique, fondée sur le silicium) est en effet très large. « Toute la question est : leurs changements de résistivité sont-ils exploitables pour bâtir des circuits efficaces ? Jusqu'ici, aucun matériau idéal ne s'est encore détaché », ajoute le chercheur.

Avec son équipe, il s'est spécialisé dans une voie originale : l'électronique organique, qui vise à traiter l'information au sein de molécules (assemblages de quelques atomes seulement), et ainsi à réduire encore les consommations énergétiques. « C'est comme cela que l'industrie a pu remplacer les LED par des équivalents organiques, les OLED,



Vue en microscopie électronique de memristors organiques mis au point par l'équipe de Vincent Derycke. Le halo sombre (sur la partie zoomée, en bas) montre l'extension du film organique greffé.

dans de nouvelles générations d'écrans plats », explique Vincent Derycke. Ce dernier ne cache pas le côté exploratoire de cette piste : « Mis à part les OLED, l'électronique organique, qui promettait au début des années 2000 de révolutionner l'électronique, n'a pas tenu toutes ses promesses et demeure un domaine de recherche principalement fondamental. Si d'éventuels neurones ou synapses organiques, très économes en énergie, deviennent réalité, ce ne sera pas avant cinq ou dix ans. »

Le défi des circuits intégrés

Malgré une multitude de matériaux proposés pour l'ingénierie neuromorphique, tous les chercheurs butent pour l'instant sur le même obstacle : le passage à l'échelle. « Un composant seul peut présenter un comportement physique remarquable, mais ce bénéfice s'estompe parfois lorsqu'on en intègre des milliers », commente Damien Querlioz. Il suffit par exemple que la tension électrique arrivant à l'entrée de chaque composant varie légèrement pour ruiner l'intérêt d'une puce neuromorphique complexe. Or, « des milliers, voire des centaines de milliers de composants à intégrer ensemble, c'est pourtant le minimum si l'on veut mettre au point de premières applications commerciales », poursuit le jeune chercheur, médaille de bronze du CNRS en 2017 pour ses travaux sur ces futures architectures neuromorphiques.

Le contrôle fin de la tension d'entrée donne encore du fil à retordre aux chercheurs. C'est l'un des défis

que se propose de relever l'équipe de Sylvain Saïghi, du Laboratoire de l'intégration du matériau au système⁸. À partir de la synapse ferroélectrique de Vincent Garcia, dite « memristor », les chercheurs tentent de construire un circuit de 1024 x 100 éléments. À travers le projet européen Ulpec, impliquant notamment IBM, Bosch et la société parisienne Chronocam, ce circuit devrait ensuite être intégré et testé au sein d'une caméra embarquée dans la voiture autonome. Restera aussi à régler le problème de la production en série des composants : « Il nous faut maintenant montrer que l'on peut produire notre memristor sur les substrats silicium habituels des industriels de la microélectronique pour envisager une production à grande échelle », résume Sylvain Saïghi.

Même ambition pour Julie Grollier. D'ailleurs, si son équipe a été la première à faire fonctionner des neurones artificiels bio-inspirés au sein d'une application, c'est parce qu'elle a usé d'un astucieux artifice : un seul nano-neurone a permis de reconstituer un circuit de 400 neurones grâce à la méthode de multiplexage temporel. « Un peu comme si un acteur s'enregistrait en train de jouer les 400 rôles d'un même film et qu'on les superposait au montage », illustre la chercheuse. Les circuits bien réels de centaines ou de milliers de neurones sont donc aujourd'hui attendus de pied ferme ! ■ H. L.

ÉVÈNEMENT

Découvrez les manifestations de la « semaine du cerveau » du 12 au 18 mars 2018 sur www.semaineducerveau.fr

Lire aussi notre dossier « Comment l'intelligence artificielle va changer nos vies » sur lejournal.cnrs.fr

7. Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie (CNRS/CEA/Université Paris-Saclay). 8. Unité CNRS/Bordeaux INP/Université de Bordeaux.

L'ESSENTIEL

- Préoccupés par notre santé, nous sommes prêts à subir de nombreux tests médicaux... qui n'apportent aucune certitude.
- Pour bien interpréter les résultats, médecins, malades et non-malades devraient se familiariser avec les statistiques.
- En apprenant à distinguer risque absolu et risque relatif, à utiliser la fréquence naturelle d'une maladie, les taux de mortalité plutôt que la survie à cinq ans, nous ne nous inquiéterons plus inutilement.

LES AUTEURS



GERD GIGERENZER travaille à l'institut Max-Planck de Berlin. WOLFGANG GAISSMAIER est professeur à l'université de Constance. ELKE KURZ-MILCKE travaille à l'Institut de mathématiques et d'informatique, à Ludwigsbourg. LISA SCHWARTZ et STEVEN WOLOSHIN sont professeurs à l'école de médecine de Dartmouth, à Hanovre, aux États-Unis.

SANTÉ: halte à la manipulation

Interpréter les résultats d'examens médicaux et d'études de risques sanitaires est un art difficile auquel peu de personnes sont initiées. Quelques conseils pour mieux comprendre leur signification ne sont donc pas inutiles.

E

n 1938, dans son essai *World Brain*, l'écrivain britannique H. G. Wells, auteur de *L'Homme invisible* et de *La Guerre des mondes*, prédisait que penser en termes statistiques serait aussi indispensable aux citoyens éduqués d'une démocratie moderne que lire et écrire. Qu'en est-il presque un siècle plus tard, en ce début du XXI^e siècle? Presque tous ceux qui vivent

dans les sociétés industrielles savent lire et écrire, mais peu savent interpréter correctement les statistiques et comprendre les notions de risque et d'incertitude. C'est aussi le lot de nombreux médecins, journalistes et hommes politiques qui, en conséquence, répandent de fausses idées dans le public.

L'inculture statistique n'est pas due à des déficits intellectuels particuliers – le «gène des statistiques» n'existe pas! – mais à divers facteurs sociaux et psychologiques: dans le domaine de la médecine, la nature paternaliste de la relation médecin-malade, l'illusion que la médecine offre des certitudes, que les interventions médicales sont toujours bénéfiques. L'anxiété et les espoirs des citoyens peuvent être facilement manipulés



Les statistiques médicales sont sujettes à diverses interprétations. Bien les comprendre éviterait des frayeurs inutiles.

pour des raisons politiques et commerciales. Avec des conséquences médicales et psychiques parfois redoutables.

Bonne nouvelle, on peut éviter certaines manipulations statistiques en médecine, donner du sens à des données chiffrées parfois peu claires, et utiliser cette information pour prendre les bonnes décisions. Et surtout, on peut tous sensibiliser les enfants aux statistiques de façon à les aider à résoudre des problèmes concrets.

Cela fait longtemps que la médecine se méfie des statistiques. Pendant des siècles, les thérapies se fondaient sur une confiance mutuelle plutôt que sur des données chiffrées, auxquelles on reprochait d'être impersonnelles ou peu pertinentes. Aujourd'hui encore, certains

médecins se fient davantage à leur intuition et à leur propre jugement qu'aux statistiques. De leur côté, nombre de patients préfèrent faire confiance à leur médecin plutôt que d'analyser eux-mêmes les résultats qui les concernent.

Les gens n'aiment pas les statistiques parce qu'ils ont besoin de certitude face à la maladie, tandis que les statistiques obligent à prendre des décisions sans certitude. Ainsi, une étude menée auprès de 1000 Allemands majeurs, en 2006, suggère que la plupart des gens considèrent que les tests de dépistage du VIH et les tests génétiques sont fiables à 100%, ce qui est faux.

De même, alors que la mammographie a réduit le risque de décès par cancer du sein des >

> femmes cinquantenaires d'environ 5 à 4 pour 1 000 en treize ans, 60% d'un échantillon aléatoire de femmes américaines pensaient que le bénéfice était 80 fois plus élevé.

Les citoyens des sociétés où la technologie est omniprésente sont confrontés à de nombreux dilemmes médicaux. Une femme enceinte âgée de 35 ans doit-elle subir une amniocentèse pour dépister une éventuelle anomalie chromosomique du fœtus, alors que cette procédure présente un risque (de l'ordre de 1%) d'entraîner une fausse couche? Doit-on vacciner les filles contre les papillomavirus humains afin de les protéger contre le cancer du col de l'utérus, alors que quelques complications ont été signalées, notamment un risque potentiel de paralysie?

Pour prendre des décisions éclairées, nous devons comprendre les statistiques médicales. En particulier, nous devons distinguer un risque absolu d'un risque relatif, et interpréter correctement la fréquence naturelle d'une maladie pour en déduire la probabilité d'en être atteints en cas de test positif. Nous devons aussi davantage nous fier aux taux de mortalité plutôt qu'aux statistiques, trompeuses, de survie à cinq ans.

RISQUES ABSOLU ET RELATIF

En octobre 1995, l'Agence de sécurité sanitaire du Royaume-Uni émit un avis selon lequel les pilules contraceptives de troisième génération doubleraient le risque de phlébite potentiellement mortelle dans les jambes ou les poumons (un caillot sanguin obstrue une veine); ce risque augmentait donc de 100%. Cette information fut transmise par courrier à 190 000 médecins généralistes, pharmaciens et directeurs de services médicaux, et sous forme de messages d'alerte dans les médias. La nouvelle émut tout le pays, et beaucoup de femmes cessèrent de prendre la pilule; l'année suivante, on compta 13 000 avortements supplémentaires en Angleterre et au pays de Galles; quelque 800 jeunes filles de moins de 16 ans eurent un enfant. Pourtant, les avortements et les grossesses augmentent le risque de thrombose dans des proportions bien supérieures à celle possiblement liée à la pilule de troisième génération.

Une telle panique aurait pu être évitée avec une meilleure information. En réalité, les données montraient qu'environ 1 femme sur 7 000 prenant une pilule de deuxième génération avait une thrombose; ce chiffre passait à 2 pour 7 000 avec la pilule de troisième génération. Ainsi, l'augmentation du risque absolu (voir les Repères, page 6) n'était que de 1 pour 7 000, alors que celle du risque relatif était, effectivement, de 100%.

Annoncer des risques relatifs peut provoquer des espoirs infondés, aussi bien que des inquiétudes inutiles. Nombre de patients et de médecins évaluent plus favorablement un traitement ou un test si les bénéfices correspondent à une diminution du risque relatif. En 2007, les travaux

de Judith Covey, de l'université de Durham, en Angleterre, le montraient: lorsque le bénéfice d'un médicament était présenté sous forme d'une réduction du risque relatif, 91% des généralistes danois le recommandaient à leurs patients. Mais lorsque l'information était présentée sous forme de réduction du risque absolu, seuls 63% recommandaient ce même médicament.

Les brochures d'information, les médecins, les revues médicales et les médias continuent à informer le public en termes de changements relatifs, en partie parce que les chiffres élevés attirent davantage l'attention. La confusion est encore plus grande quand on conjugue bénéfices et risques. Ainsi une publicité a affirmé que le traitement hormonal substitutif recommandé pour compenser le déficit en œstrogènes chez les femmes ménopausées «protège les femmes contre le cancer colorectal (jusqu'à plus de 50%)», tandis que le risque de cancer du sein «pourrait augmenter de 0,6%». En fait, le bénéfice relatif de 50% correspond à un nombre absolu inférieur à 6 pour 1000. En d'autres termes, moins de 6 femmes sur 1000 sont protégées du cancer colorectal par le traitement. Cela signifie que cette thérapie engendre au total plus de cancers qu'elle n'en prévient. Néanmoins, selon une étude de 2003 dans laquelle on distribuait cette brochure à 80 femmes âgées de 41 à 69 ans, 60 en avaient conclu le contraire.

Le risque absolu est plus informatif parce qu'il intègre l'information sur les proportions réelles à partir desquelles sont effectués les

LA CERTITUDE N'EXISTE PAS

Les questions à se poser quand on parle d'un risque:

De quel risque s'agit-il?

À quoi se réfère le risque: est-ce le risque de mourir d'une maladie, d'attraper une maladie ou d'en présenter les symptômes? Parle-t-on de risque absolu (la probabilité de développer une maladie durant une période de temps donnée) ou de risque relatif (le rapport entre le risque dans le groupe concerné et le risque dans un groupe témoin).

Quelle est l'échelle de temps?

On se représente plus concrètement les risques à l'horizon d'une dizaine d'années plutôt que de la vie entière.

Quelle est l'importance du risque?

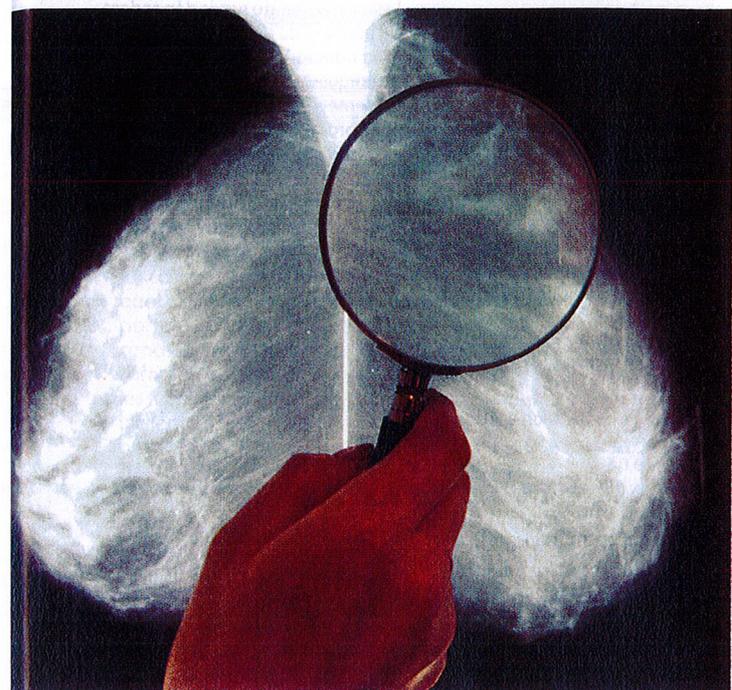
Les nombres devraient être exprimés en termes absolus, ou bien sous une forme comparative, liant le risque à d'autres.

Ce risque me concerne-t-il?

Le calcul du risque repose-t-il sur l'étude d'individus au profil similaire (âge, sexe, santé...)?

L'annonce de risques relatifs peut susciter des espoirs infondés ou des inquiétudes inutiles

calculs. Du risque absolu on peut déduire le risque relatif, mais l'inverse n'est pas vrai. Une réduction de 50% du risque relatif peut décrire une diminution importante de 200 à 100 pour 10 000, ou bien minime, de 2 à 1 pour 100 000. En médecine, les résultats apportés



Une mammographie positive peut provoquer une angoisse considérable. Elle serait pourtant bien moins alarmante si l'on annonçait qu'avec ce résultat, la probabilité d'avoir un cancer du sein est bien inférieure à 100%.

par les essais cliniques sont particulièrement fiables, mais s'ils sont exprimés de façon inadéquate, le public n'a aucune chance de les interpréter correctement.

DÉMÊLER LE VRAI DU FAUX POSITIF

Prenons le cas d'une femme qui, face au résultat positif d'une mammographie, demande à son médecin si elle a vraiment un cancer du sein, ou quelle est la probabilité qu'elle en soit vraiment atteinte. En 2007, l'un de nous (G. Gigerenzer) a demandé à 160 spécialistes de répondre à une telle question, en tenant compte des données suivantes: la prévalence de cancer du sein dans la région de la patiente est de 1%; si une femme a un cancer du sein, la probabilité que le test soit positif (sensibilité) est de 90%; si une femme n'a pas de cancer du sein, la probabilité qu'un test soit quand même positif (faux positif) est de 9%.

Quelle est, parmi les propositions suivantes, la meilleure réponse à donner à la patiente? (a) la probabilité qu'elle ait un cancer du sein est d'environ 81%; (b) sur 10 femmes ayant une mammographie positive, environ 9 ont un cancer du sein; (c) sur 10 femmes ayant une mammographie positive, environ 1 a un cancer du sein; (d) la probabilité qu'elle ait un cancer du sein est d'environ 1%.

La meilleure réponse est la troisième: en moyenne, sur 10 femmes dont les résultats sont positifs au dépistage mammographique, une seule environ a effectivement un cancer du sein. Les 9 autres sont alarmées inutilement. Seuls 21% des spécialistes interrogés avaient choisi la bonne réponse...

Nombre de médecins ne connaissent pas la probabilité qu'une personne soit effectivement malade en cas de test de dépistage positif, c'est-à-dire la valeur prédictive positive de ce test. Ils sont aussi incapables de l'estimer à partir de probabilités dites conditionnelles telles que la sensibilité du test (la probabilité d'un test positif en présence de la maladie) et la spécificité du test (le taux de faux positifs). De telles lacunes risquent d'entretenir des frayeurs inutiles. Or plusieurs mois après avoir reçu un résultat faux positif de mammographie, 1 femme sur 2 signale une anxiété importante liée à ce résultat, et 1 sur 4 rapporte que cette anxiété a affecté son humeur et sa vie quotidienne.

Les médecins seraient plus à même de déduire les probabilités correctes avec des statistiques relatives aux tests présentées sous forme de fréquences naturelles. Par exemple, avec les données de la mammographie évoquées plus haut: 10 femmes sur 1000 ont un cancer du sein; sur ces 10 femmes, 9 ont un test positif; sur les 990 femmes non atteintes, environ 89 ont quand même un résultat positif. Ainsi, 98 patientes (89 + 9) ont un test positif, mais seulement 9 ont un cancer.

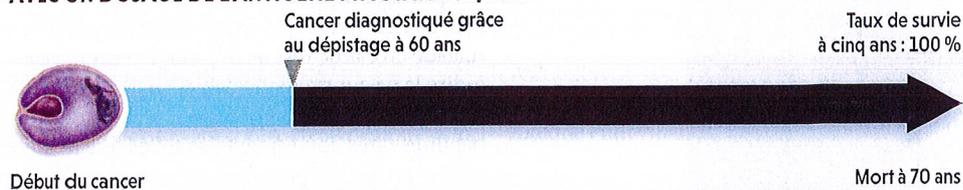
Les médecins devraient toujours informer leurs patients qu'aucun test n'est parfait, et que les résultats doivent être interprétés avec prudence, ou qu'ils doivent être réitérés pour voir si l'on obtient à nouveau le même résultat. Toutes les femmes qui passent une mammographie devraient savoir que les résultats indiquant une suspicion peuvent être de fausses alertes.

Une incertitude similaire existe pour tous les tests de dépistage, y compris celui du VIH. Bien que le test détecte effectivement 99,9% des infections réelles, et que 99,99% des résultats négatifs soient effectivement négatifs, le très faible risque chez les hommes hétérosexuels implique que le risque qu'ils ont d'être infectés n'excède pas 50% même quand un test est positif (voir l'encadré page 97). Cependant, lorsque le risque intrinsèque est supérieur, comme chez les homosexuels qui ont des rapports sexuels non protégés ou les toxicomanes qui partagent leurs seringues, la probabilité que le sujet soit infecté par le virus en cas de test positif est presque de 100%. Ainsi, le risque intrinsèque à un groupe donné détermine la signification d'un test positif.

UN INDICE TROMPEUR

Dans un spot télévisé de campagne électorale, en 2007, l'ancien maire de New York Rudy Giuliani annonçait: «J'ai eu un cancer de la prostate, il y a cinq ans. Mes chances de survie étaient de 82% aux États-Unis. En Angleterre, où le système de santé est socialisé, elles n'auraient été que de 42%. Dieu merci, j'ai guéri.» L'ex-édile sous-entendait qu'il avait eu de la chance de vivre à New York. Cette déclaration a fait les gros titres de la presse américaine. Pourtant, les >

AVEC UN DOSAGE DE L'ANTIGÈNE PROSTATIQUE, PSA



SANS DOSAGE DU PSA



Les statistiques de survie dépendent du moment du diagnostic, ce qui rend trompeuses les données statistiques. Dans le cas fictif présenté ici, un diagnostic de cancer de la prostate à l'âge de 60 ans (*en haut*) peut faire augmenter le taux de survie à cinq ans par rapport à un diagnostic posé sept ans plus tard (*en bas*). Pourtant, dans les deux cas, l'âge du décès est le même : 70 ans.

> chiffres qu'il avait donnés trahissaient une grosse erreur d'interprétation!

Selon les données de l'année 2000 qu'il a apparemment utilisées, sur les 49 Britanniques sur 100000 chez qui un cancer de la prostate avait été diagnostiqué, 28 étaient décédés au bout de cinq ans, ce qui correspondait à un taux de survie à cinq ans d'environ 43%. Le taux correspondant aux États-Unis était de 82%, ce qui suggérerait que les Américains avaient deux fois plus de chances de survivre que les Britanniques à un cancer de la prostate. Mais cette déduction était fautive, parce que les statistiques de survie reflètent davantage des différences de diagnostic entre les deux pays que des traitements de meilleure qualité.

ÊTRE MALADE QUELQUE PART

Pour le comprendre, imaginons un groupe fictif de patients souffrant d'un cancer de la prostate diagnostiqué, d'après leurs symptômes, à l'âge de 67 ans au Royaume-Uni, et qui meurent tous à 70 ans. Chaque malade n'a survécu que trois ans, et en conséquence le taux de survie à cinq ans de ce groupe est égal à zéro. Prenons un groupe comparable aux États-Unis, où les médecins détectent la plupart des cancers de la prostate en dosant un antigène spécifique (le PSA), alors que ce dosage n'est pas réalisé en routine au Royaume-Uni. Ces patients sont diagnostiqués plus tôt, vers 60 ans, mais ils meurent quand même à 70 ans. Ils ont tous survécu dix ans, et en conséquence le taux de survie à cinq ans est de 100%. Bien que les taux de survie soient radicalement différents, l'âge du décès est le même dans les deux groupes. Ainsi, en fixant le moment du diagnostic plus tôt, on augmente les taux de survie (biais d'avance au diagnostic) bien qu'aucune vie n'ait été prolongée ou sauvée (*voir la figure ci-dessus*).

Des taux de survie artificiellement élevés peuvent aussi résulter d'un «surdiagnostic», par exemple la détection d'anomalies qui sont des cancers, mais qui n'évolueront jamais assez pour menacer la vie du patient qui décèdera d'une

autre cause. Supposons 1000 hommes atteints d'un cancer de la prostate évolutif ne bénéficiant pas d'un test de dépistage. Au bout de cinq ans, 440 seront toujours en vie, ce qui représente un taux de survie à cinq ans de 44%. Dans un autre groupe de 3000 hommes, le dosage du PSA révèle que 1000 ont un cancer évolutif et 2000 un cancer non évolutif (ils ne mourront pas de ce cancer dans les cinq ans). En ajoutant ces 2000 cas aux 440 qui ont survécu au cancer évolutif, on aboutit à un taux de survie à cinq ans gonflé, de 81%, alors que la mortalité n'a pas été réduite.

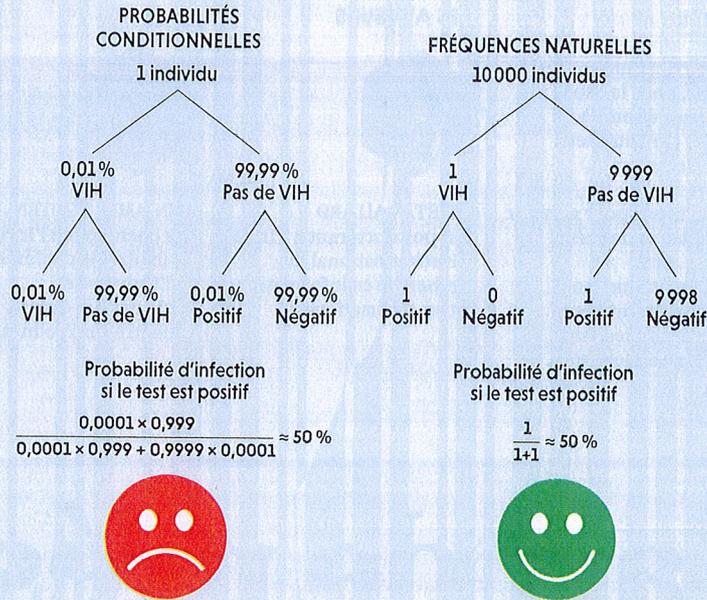
Aux États-Unis, le dépistage du cancer de la prostate par dosage du PSA a conduit à la fin des années 1980 à une explosion du nombre de nouveaux cancers diagnostiqués. Au Royaume-Uni, l'effet a été bien plus faible à cause d'une utilisation moins systématique du dosage de cet antigène. Cette disparité dans les diagnostics explique en grande partie pourquoi le taux de survie à cinq ans pour les cancers de la prostate est plus élevé outre-Atlantique.

Lorsque les pratiques diagnostiques diffèrent d'un pays à l'autre, la différence des taux de mortalité à cinq ans ne reflète pas de façon fiable la différence des taux de mortalité. Et pourtant, nombre d'agences officielles continuent de faire état de taux de survie à cinq ans. Un rapport du Bureau des statistiques du Royaume-Uni notait que le taux de survie à cinq ans du cancer du côlon était de 60% aux États-Unis contre 35% au Royaume-Uni. Les experts qualifiaient ce résultat de «scandaleux» et appelaient à un doublement des dépenses gouvernementales pour le traitement du cancer du côlon. En fait, les taux de mortalité dus à ce cancer sont à peu près les mêmes dans les deux pays.

Plus curieux encore, en 2001, une brochure publicitaire du Centre Anderson, au Texas, mélangeait les taux de survie avec les taux de mortalité: «Tandis que le taux de mortalité du cancer de la prostate a fluctué entre 1960 et 1990, le taux de survie au cancer de la prostate des patients du Centre Anderson a continué de progresser.»

PRÉVOIR UNE INFECTION

Si votre test de dépistage du VIH est positif et que vous êtes un homme à faible risque d'infection (hétérosexuel, non drogué...), quel est le risque que vous soyez effectivement porteur du virus? Les probabilités conditionnelles (à gauche) proposent un calcul compliqué. En revanche, en se fondant sur les fréquences naturelles (à droite), on obtient facilement la réponse: sur 10 000 hommes, on s'attend à ce qu'un seul soit infecté et que son test soit donc positif; parmi les 9 999 qui ne sont pas infectés, 1 devrait aussi avoir un résultat positif. En conséquence, on a deux tests positifs, mais un seul individu infecté. Donc la probabilité d'infection donnée par un test positif n'est pas de 100 %, mais de 50 %.



Les taux de mortalité sont des indicateurs plus fiables de la valeur des programmes de dépistage que les taux de survie à cinq ans. Si l'on se fie à ces taux, un homme doit-il faire systématiquement un dosage de l'antigène PSA? Un fumeur doit-il passer systématiquement un scanner des poumons? Il est vrai que ces deux examens détectent plus de cancers à un stade précoce; mais aucun des deux ne permet de réduire la mortalité.

LES ÉPIDÉMIES DE DIAGNOSTICS

Les gens considèrent souvent les tests de dépistage comme des garants de leur santé. Toutefois, des examens supplémentaires peuvent conduire à des interventions médicales inutiles dont les effets sont parfois délétères. Et pour les nombreux patients inutilement diagnostiqués, le traitement a forcément des conséquences indésirables. Une épidémie de diagnostics peut être aussi dangereuse pour la santé que la maladie.

Les erreurs d'interprétation des statistiques seraient moins fréquentes si les chercheurs, les médecins et les médias utilisaient des données chiffrées directes au lieu de nombres qui prêtent à confusion: le risque absolu au lieu du risque relatif, les fréquences naturelles à la place des probabilités conditionnelles, et les taux de mortalité plutôt que les taux de survie à cinq ans. En outre, nous devons mieux éduquer les jeunes à la science du risque et de l'incertitude.

Comme le suggérait H. G. Wells, les statistiques devraient être enseignées en même temps que la lecture et l'écriture. De fait, aux États-Unis, l'Association nationale des enseignants de mathématiques insiste pour que l'enseignement des statistiques et des probabilités commence à l'école primaire. Si les

enfants apprenaient que le monde n'est pas fait de certitudes et ce d'une façon ludique, les statistiques seraient mieux comprises.

Au lieu d'apprendre aux étudiants comment appliquer des formules de probabilité pour résoudre des problèmes virtuels, les professeurs devraient leur montrer comment utiliser les statistiques pour résoudre des problèmes concrets. Par exemple, ils pourraient leur enseigner l'usage des statistiques et des probabilités quand il s'agit de décider comment se comporter face aux drogues, à la consommation d'alcool, à la conduite automobile, aux biotechnologies et à d'autres questions importantes pour la vie quotidienne.

Un livre scolaire américain du secondaire raconte l'histoire vraie d'une mère célibataire de 26 ans. À la suite d'un test positif de dépistage du VIH, elle perd son travail, déménage dans un foyer hébergeant d'autres personnes séropositives, a des relations sexuelles non protégées avec l'un d'entre eux, et attrape une bronchite. Son médecin lui prescrit alors un nouveau test de dépistage. Le résultat est négatif, tout comme celui de son échantillon sanguin précédent, qui a été réanalysé. Cette femme a vécu un cauchemar parce que ses médecins n'ont pas compris qu'un résultat positif à ce test n'était pas un verdict définitif, mais qu'il signifiait que cette femme avait une probabilité d'être infectée de 50%, étant donné son appartenance à un groupe à faible risque.

L'éducation statistique peut changer des vies, aider les gens à prendre de meilleures décisions personnelles, à reconnaître les messages trompeurs et à développer une attitude plus sereine envers leur santé. Comme le recommandait le philosophe Emmanuel Kant: «Osez savoir!» ■

BIBLIOGRAPHIE

WOLOSHIN ET AL., *Know your chances: Understanding health statistics*, University of California Press, 2008.

A. PLEASANT, *Communiquer sur les statistiques et le risque*, *SciDev Net*, 15 décembre 2008.

A. FAGERLIN ET AL., *Making numbers matter: present and future research in risk communication*, *Am. J. of Health and Behav.*, vol. 31, pp. S47-S51, 2007.

G. GIGERENZER, *Calculated risk: how to know when numbers deceive you*, Simon & Schuster, 2003.

B. FALISSARD, *Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vie*, Masson, Abrégés, 3^e éd., 2005.

Ce froid qui vient de la lumière

Refroidir des atomes peut paraître une étrange idée, à plus forte raison quand on se sert de lasers pour y arriver. C'est pourtant le meilleur moyen que la science a trouvé pour mesurer précisément le temps, valider des théories physiques fondamentales et étudier certaines propriétés exotiques de la matière.

Quelle chose bizarre que la lumière ! Capable de nous éclairer, de nous chauffer ou de transporter de l'information, elle peut aussi générer du froid. Et pas n'importe lequel : le plus glacial que l'on puisse imaginer..., jusqu'au milliardième de degré au-dessus du **zéro absolu**, soit $-273,15\text{ °C}$! Le secret de cette stupéfiante réfrigération ? Partant du principe que la température d'un gaz augmente avec la vitesse d'agitation des atomes qui le composent, les physiciens ont eu l'idée de ralentir ces atomes. Comment ? En exploitant la **pression de radiation** qu'exercent sur eux des faisceaux laser. En effet, lorsque le grain de lumière que constitue un photon est absorbé (ou émis) par un atome, il lui transmet (ou lui enlève) une certaine quantité de mouvement, exactement de la même manière qu'un tir de boulet fait reculer un canon. Résultat : la vitesse de l'atome est légèrement modifiée, de quelques centimètres par seconde. Une variation de vitesse qui peut sembler négligeable si on la compare aux centaines de mètres par seconde que l'atome met pour se déplacer à température ambiante. Mais si l'on répète l'opération 30 millions de fois par seconde grâce à un laser, cette différence devient décisive !

Le refroidissement d'atomes par laser

Cette idée a été mise en œuvre dès les années 1980 au travers des mélasses optiques, des dispositifs qui ont révolutionné plusieurs domaines de la physique moderne, de la métrologie de haute précision aux recherches sur de nouveaux états de la matière. Le principe : croiser dans une enceinte plusieurs faisceaux laser de directions opposées afin de créer une sorte de **milieu visqueux** (la fameuse mélasse) où les atomes d'un gaz vont, en quelque sorte, se retrouver « englués » par l'action des photons. De nos jours, ce type d'équipement est utilisé par des dizaines de laboratoires à travers le monde. Les mélasses optiques reposent

sur l'exploitation astucieuse de l'effet Doppler, un phénomène employé entre autres par les radars et les appareils d'échographie, selon lequel la fréquence d'une onde est perçue différemment si l'on est en mouvement par rapport à l'émetteur de cette onde (et vice versa). C'est en raison de cet effet que, par exemple, la sirène d'un camion de pompiers qui se rapproche semble passer du grave à l'aigu pour le piéton et repasser au grave lorsque le véhicule s'éloigne.

On sait qu'un atome n'absorbe la lumière qu'à certaines fréquences particulières, dites de résonance. Il se trouve que, sur un atome au repos, la pression exercée par deux lasers de directions opposées s'annule. En revanche, en réglant les lasers sur des fréquences légèrement inférieures à celle de résonance, dès que l'atome est en mouvement, par effet Doppler, la fréquence apparente du laser qui vient à sa rencontre ...

ZÉRO ABSOLU

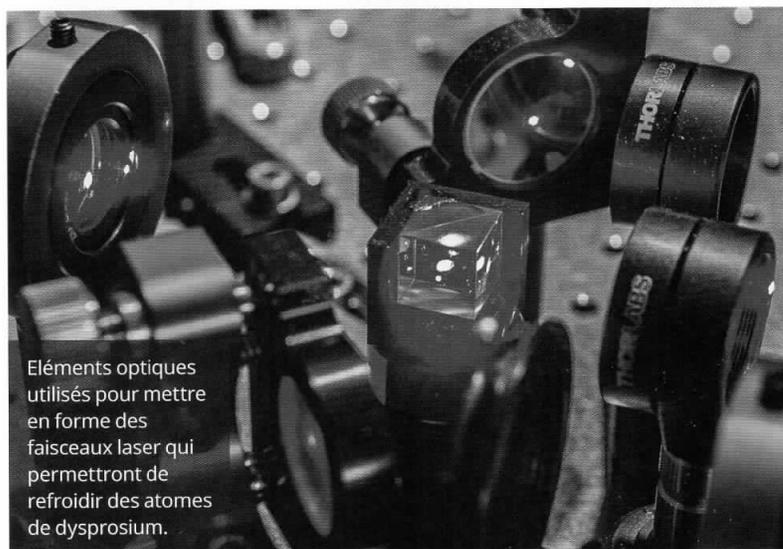
Cette température égale à $-273,15\text{ °C}$ (ou 0 kelvin) est la plus basse qui puisse exister dans l'Univers. Tous les atomes et particules deviennent alors parfaitement immobiles.

PRESSION DE RADIATION

À l'instar de la pression d'un gaz, qui résulte des chocs contre une surface des atomes (ou molécules) constituant ce gaz, la pression de radiation résulte des chocs des photons constituant un rayon de lumière.

VISCOSITÉ

En physique, la viscosité qualifie la résistance d'un matériau à l'écoulement. Plus elle est élevée, plus l'écoulement sera lent. Le miel, par exemple, a une viscosité plus élevée que l'eau.



Éléments optiques utilisés pour mettre en forme des faisceaux laser qui permettront de refroidir des atomes de dysprosium.

© H. FARGUE/ALCONIS PHOTOGRAPHIE

... atteint la fréquence de résonance. Le laser freine alors l'atome par pression de radiation. Les physiciens réussissent ainsi, en une fraction de seconde, à ralentir des millions d'atomes jusqu'à des vitesses d'une dizaine de centimètres par seconde seulement. C'est-à-dire qu'ils parviennent à les porter à des températures de l'ordre du... dix-millionième de degrés au-dessus du zéro absolu !

Atomes et instruments de précision

Cette technique de refroidissement par effet Doppler – et, plus généralement, celle des mélasses optiques – a valu à Claude Cohen-Tannoudji, du laboratoire Kastler-Brossel (LKB)¹, et à ses collègues américains Steven Chu et William Daniel Phillips, le prix Nobel de physique en 1997. Elle a aussi été à l'origine d'une nouvelle génération d'instruments de mesure tels que les accéléromètres, les gyromètres... et surtout les horloges atomiques (*lire l'encadré ci-contre*).

Or, il s'avère que les performances des horloges atomiques dépendent directement de la vitesse des atomes, donc de leur température. « *De fait*, explique Noël Dimarcq, directeur de recherche CNRS au laboratoire Syrte², *plus les atomes sont rapides, moins les physiciens disposent de temps pour comparer, avec précision, la fréquence de l'oscillateur à celle de l'atome et plus l'effet Doppler décalant les fréquences est important, ce qui a, in fine, une incidence sur la qualité de la mesure* ». D'où la conception à la fin des années 1980 dans des laboratoires comme le Syrte et le LKB, en France, d'un nouveau type d'horloge : les fontaines atomiques. Dans ce dispositif, des atomes de césium sont refroidis dans une mélasse optique, puis lancés vers le haut avant de retomber sous l'effet de la gravité au terme d'une ascension d'environ un mètre. En les sondant au moment de leur montée et de

leur descente et en répétant l'opération un grand nombre de fois, les physiciens obtiennent avec cette méthode une définition de la seconde d'une précision de seize chiffres ; soit une exactitude cent fois meilleure que celle obtenue avec des horloges classiques ! Autre avantage : leur stabilité. En effet, les fontaines

Du froid pour mesurer le temps

Chaque mois, 400 horloges, réparties à travers le monde, participent à l'établissement du temps atomique international (TAI) et du temps universel coordonné (UTC) sur lequel repose l'heure

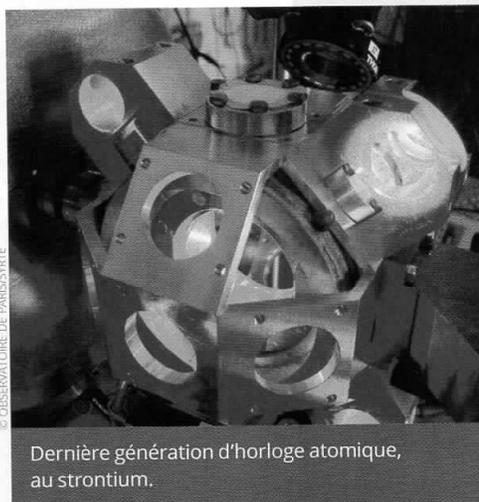
légale française. De l'exactitude de ces appareils découle une mesure précise non seulement de la seconde, mais aussi de nombreuses autres unités du Système international (SI), en particulier le mètre. Quant à leurs utilisations directes, elles sont hautement stratégiques, allant du positionnement par satellite, comme le GPS ou Galileo, à l'astronomie.

Inventé il y a plus d'un demi-siècle, le procédé

par lequel ces machines comptent les secondes repose sur le fait que l'atome a la propriété d'absorber la lumière puis de la réémettre à des fréquences particulières qui dépendent de la nature de ce même atome. Le principe d'une horloge atomique consiste à ajuster la fréquence d'un oscillateur à celle fournie par un de ces atomes. Pour cela, les physiciens emploient le plus souvent le césium. La raison de ce choix ? Ils veulent que leur horloge égrène des secondes ! Or, selon les conventions internationales en vigueur depuis 1967, la seconde correspond très exactement au temps que met le césium pour effectuer 9 192 631 770 oscillations.



➤ Voir le film « Les nouveaux maîtres du temps » sur lejournald.cnrs.fr



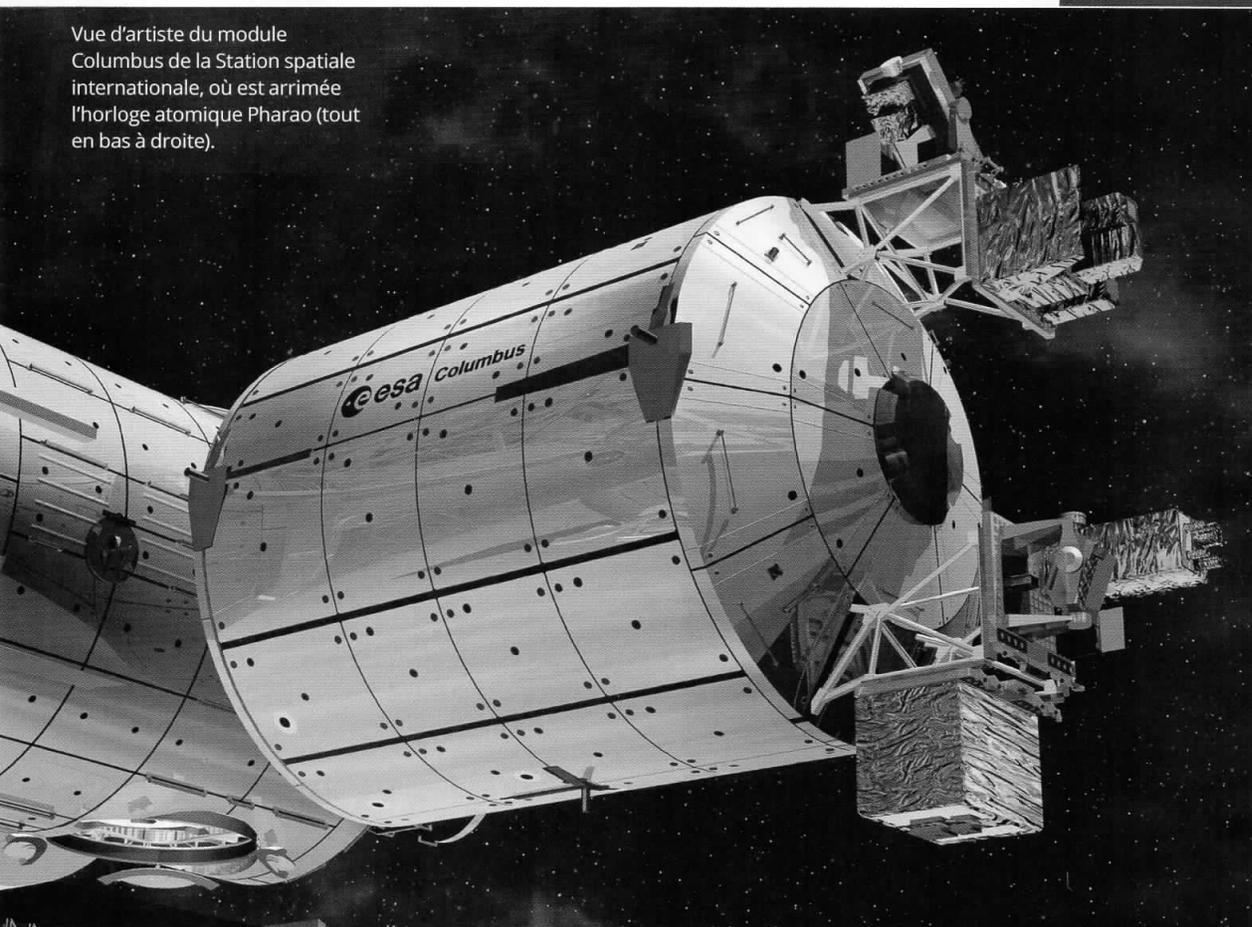
Dernière génération d'horloge atomique, au strontium.

En une fraction de seconde, on ralentit les atomes jusqu'à des vitesses d'une dizaine de centimètres par seconde.

atomiques ne dérivent que d'une seconde tous les... 300 millions d'années !

Ces performances – quoiqu'elles aient déjà été dépassées par l'arrivée des horloges optiques utilisant des fréquences atomiques 50 000 fois plus élevées que celles du césium – ne sont pas uniquement exploitées pour la seule mesure du temps. Des systèmes tels que le GPS – dont le temps de référence est synchronisé à l'aide de fontaines atomiques – en bénéficient aussi. On les utilise aussi en recherche fondamentale pour vérifier certaines

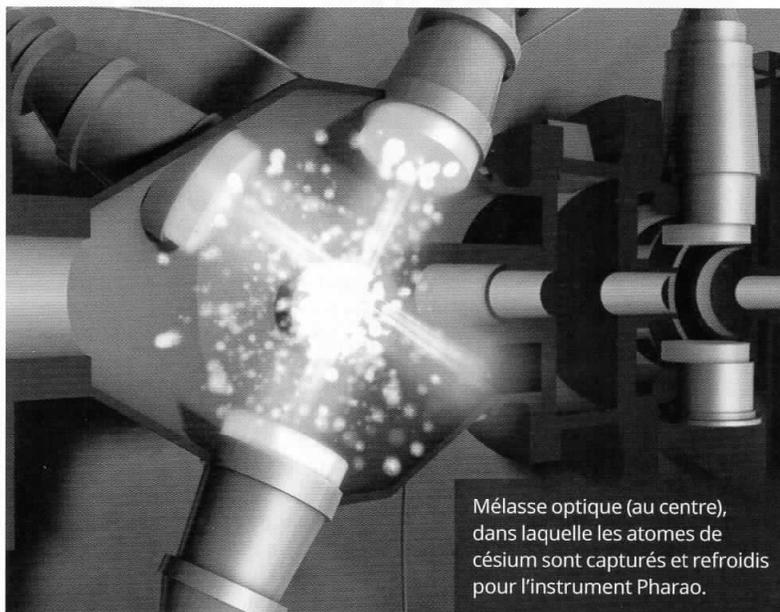
Vue d'artiste du module Columbus de la Station spatiale internationale, où est arrimée l'horloge atomique Pharaon (tout en bas à droite).



théories physiques comme la relativité. Actuellement en préparation, la mission ACES de l'Agence spatiale européenne va, par exemple, consister à installer dans les prochaines années à bord de la Station spatiale internationale, l'horloge Pharaon à atomes de césium refroidis par laser. Celle-ci est développée par le Centre national d'études spatiales avec le concours de plusieurs laboratoires et industriels français³. En comparant les mesures de cet instrument à celles d'équipements semblables restés sur Terre, les physiciens vont pouvoir tester le principe de la relativité générale d'Einstein à des niveaux inédits de précision.

Vers des états exotiques de la matière

Le refroidissement d'atomes par laser a toutefois des limites. En effet, les physiciens ont constaté qu'au-delà d'un certain niveau d'abaissement de la température, les atomes confinés dans les mélasse optique les plus denses cessent de ralentir et finissent par s'assembler et former des molécules. Cela a conduit à imaginer une technique complémentaire tirant parti d'une autre propriété de la lumière, qui « attire » les atomes dans les endroits où elle est la plus intense, jusqu'à les y confiner. Le procédé consiste donc à utiliser une mélasse optique pour « remplir » une de ces zones de forte irradiation ; puis à abaisser peu à peu l'intensité de cette lumière, de façon à évacuer du mélange les atomes véloces pour ne conserver que les plus lents. Ce refroidissement par évaporation aboutit alors à des résultats spectaculaires. Il permet en



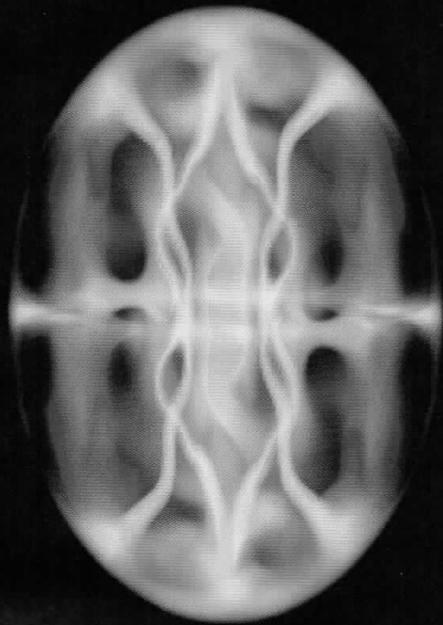
Mélasse optique (au centre), dans laquelle les atomes de césium sont capturés et refroidis pour l'instrument Pharaon.

particulier de porter la température d'un nuage d'atomes à des valeurs de l'ordre du nano-kelvin, soit un milliardième de degré au-dessus du zéro absolu !

Des niveaux si bas qu'ils frôlent l'immobilité la plus totale, un monde où la matière change complètement de comportement pour acquérir des propriétés franchement exotiques. Certains gaz deviennent ainsi superfluides, acquérant l'étonnante capacité de s'écouler ...

1. Unité CNRS/ENS/UPMC/Collège de France. 2. Systèmes de référence temps-espace (CNRS/Observatoire de Paris/UPMC/LNE). 3. En particulier, les laboratoires LKB et Syrte et l'industriel Sodern.

Simulation informatique d'un condensat de Bose-Einstein, obtenu en confinant et en refroidissant des atomes jusqu'à une température proche du zéro absolu.



© NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS

... sans plus aucune viscosité. « En particulier, indique Jean Dalibard, professeur au Collège de France, il devient possible de créer à partir de bosons (en l'occurrence, des atomes dont le noyau contient un nombre pair de neutrons), des condensats de Bose-Einstein gazeux, un état de la matière dont l'existence fut prédite dans les années 1920. » Dans ces milieux, des millions d'atomes

placés dans un même état d'énergie et devenus indiscernables les uns des autres se mettent à marcher au pas à la manière de petits soldats, et se comportent comme les photons dans les lasers. Leur mise en évidence a permis aux Américains Eric Cornell et Carl Wieman et à l'Allemand Wolfgang Ketterle d'obtenir le prix Nobel de physique en 2001. « Cette matière quantique peut être ensuite placée dans des « boîtes » formées par de la lumière et il est alors possible d'étudier son transport d'une boîte à l'autre, en analogie avec le transport des charges dans un circuit électronique », explique le chercheur. Du fait de leurs dimensions caractéristiques, ces condensats de Bose-Einstein (et leur équivalent, les gaz de Fermi, obtenus non plus avec des bosons mais des fermions, atomes à nombre impairs de neutrons) pourraient permettre des avancées bien au-delà des accéléromètres, gyromètres et horloges atomiques. « Les physiciens cherchent notamment, assure Jean Dalibard, à les utiliser comme des simulateurs quantiques, à même de les aider à résoudre des problèmes d'une haute complexité dans des domaines aussi ardu que la physique hors équilibre, la matière topologique ou encore la supraconductivité à haute température. » De quoi fortamment échauffer les esprits des scientifiques... II V. T. M.

Supraconductivité: et pour quelques degrés de plus...

La supraconductivité a été découverte en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes : ce dernier a constaté que quand le mercure était refroidi en dessous de -269°C (4,2 kelvins) il conduisait le courant électrique sans aucune résistance – et donc sans aucune déperdition de l'énergie électrique sous forme de chaleur. On s'est aperçu ensuite que la plupart des métaux deviennent supraconducteurs à condition d'être refroidis à des températures voisines du zéro absolu, que l'on

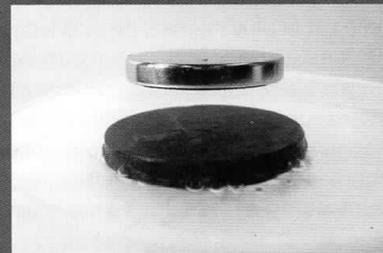
obtient généralement en les plongeant dans de l'hélium liquide. Plus récemment, on a découvert que certains alliages spéciaux, tels les cuprates et les pnictures, pouvaient devenir supraconducteurs à environ 80 kelvins, une température que l'on peut obtenir grâce à de l'azote liquide, beaucoup plus accessible que l'hélium liquide. Depuis, les chercheurs tentent de comprendre d'où vient cette supraconductivité, dite à haute température, pour pouvoir l'améliorer et, pourquoi pas, trouver des

supraconducteurs à température ambiante, qui ne nécessiteraient donc plus aucune réfrigération. Utilisée en recherche fondamentale pour des accélérateurs de particules comme le LHC, la supraconductivité pourrait déboucher sur de nouvelles applications en imagerie médicale, pour la lévitation électromagnétique et le stockage d'électricité.



Lire notre article « Supraconductivité, une révolution qui venait du froid » sur lejournal.cnrs.fr

Lévitation d'un aimant placé au-dessus d'une pastille de supraconducteur cuprate.



© J. BOBROFF/CNRS PHOTOCHÈQUE

Le laser passé aux rayons X

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

Première application industrielle de la physique quantique, le laser a évolué d'une simple curiosité de laboratoire, dans les années 1960, à une réalisation instrumentale majeure. Une vingtaine de chercheurs ont reçu le prix Nobel pour des travaux en lien avec ce concentré d'énergie lumineuse, dont le Français Gérard Mourou en 2018.

Pressenti par la science-fiction, le laser est devenu réalité à la suite de la découverte du phénomène d'émission stimulée, décrit par Albert Einstein en 1917. Dans son article « Sur la théorie quantique du rayonnement », consacré aux interactions entre la matière et le rayonnement au niveau microscopique, il affirme que l'émission d'un faisceau électromagnétique peut être stimulée par l'existence préalable d'un rayonnement de même nature, qui peut induire un mécanisme d'amplification en cascade (1). L'idée est nouvelle, car une onde qui traverse un milieu matériel est généralement absorbée, et non amplifiée. En outre,

cette émission stimulée, qui réalise une véritable duplication de photons, produit un rayonnement unidirectionnel, associé à une longueur d'onde unique, alors que, dans le processus habituel, les ondes sont émises dans toutes les directions et dans toute une gamme de fréquences. Il faut attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale pour que l'idée d'Einstein se concrétise. Pendant le conflit, sous la pression de leurs gouvernements respectifs, nombre de physiciens d'élite ont travaillé sur les ondes radars. Après la guerre, riches de l'expérience acquise en matière d'oscillateurs et d'amplificateurs, certains d'entre eux cherchent le moyen de créer de nouvelles sources de rayonnement, plus performantes



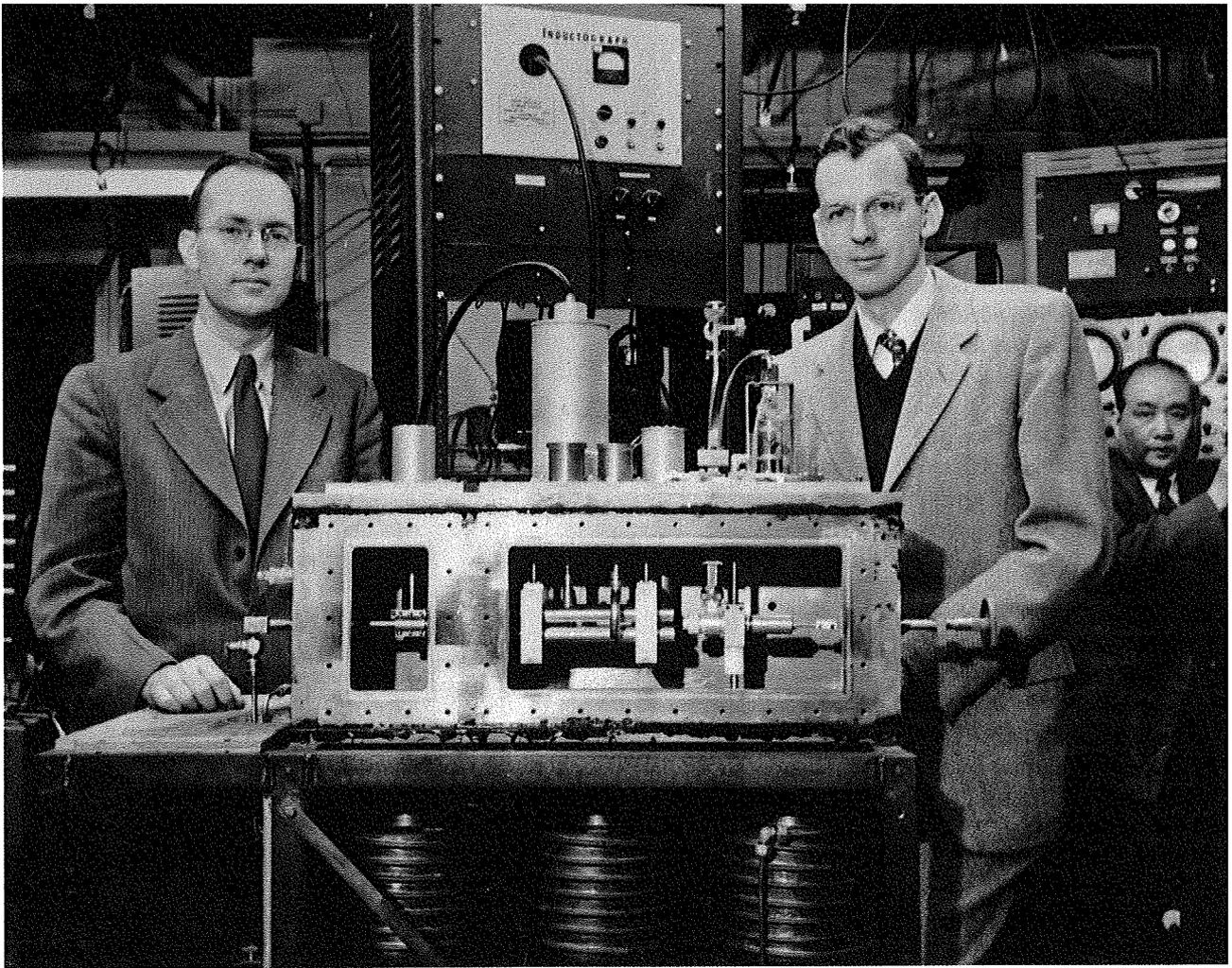
AGRÉGÉE DE PHYSIQUE

À travers ses livres, cette normalienne passionnée de vulgarisation scientifique cherche à faire connaître les sciences par l'approche historique ou l'anecdote. Son dernier ouvrage, intitulé *Sciences et technologie au quotidien*, est paru cette année aux éditions Ellipses.

encore. Tel est le cas de l'Américain Charles H. Townes, qui a pour ambition de concevoir un maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), c'est-à-dire un appareil apte à amplifier des micro-ondes par émission stimulée. Townes, qui s'est rendu compte que des atomes ou des molécules pouvaient produire les longueurs d'onde souhaitées, veut transposer aux molécules les techniques utilisées dans les tubes amplificateurs à faisceau d'électrons des radars. Une démarche qui ne fait pas l'unanimité. Certains de ses collègues ironisent sur l'acronyme « maser », qui ne signifierait rien d'autre que « *means of acquiring support for expensive research* », c'est-à-dire un « moyen d'acquérir des fonds pour des recherches coûteuses ». En 1953, Townes risque de se voir couper les crédits de recherche. « *Charlie, cela ne va pas marcher, et tu le sais. Tu gaspilles l'argent du département, il faut arrêter* », répète son directeur, le Prix Nobel de physique Isidor Isaac Rabi. Mais Townes

Contexte

Équipant superhéros et aventuriers interstellaires, le laser s'est fait une place dans l'imaginaire collectif comme arme de destruction. Pourtant, depuis cinquante ans, ses applications civiles ont pris de l'ampleur, dans des secteurs aussi variés que la médecine, l'industrie, la météorologie, l'art ou la recherche fondamentale.



▲ Tenace, l'Américain Charles H. Townes (à gauche), épaulé notamment par James P. Gordon, a réussi à concevoir le maser, ancêtre du laser.

persévère. À juste titre, car sa ténacité finit par porter ses fruits. Les premiers masers voient le jour en décembre de la même année, à l'université Columbia, à New York. Épaulé par James P. Gordon et Herbert J. Zeiger, Townes parvient à produire un flux de photons identiques grâce aux vibrations de molécules d'ammoniac. L'appareil de Townes, qui émet à la longueur d'onde de 13 mm, comporte un jet d'ammoniac dans lequel ont été sélectionnées les molécules d'énergie appropriée, guidées vers une cavité qui, par un phénomène de résonance, renforce et accroît l'amplitude des ondes émises. En 1964, Townes partagera le prix Nobel de physique avec les Soviétiques Nikolaï G. Bassov et Alexandre M. Prokhorov qui, de leur côté, avaient réalisé des travaux de même nature en URSS, à l'Institut de physique Lebedev de Moscou. Tandis que les premiers masers trouvent

leurs applications, notamment pour délivrer les fréquences de référence des horloges atomiques, Townes, en tandem avec son beau-frère Arthur L. Schawlow, chercheur aux laboratoires Bell où lui-même est consultant, aspire à amplifier la lumière visible. Une gageure, car la probabilité d'une émission stimulée diminue avec la longueur d'onde. Les longueurs d'onde du visible, plus de 1 000 fois inférieures à celles des micro-ondes, impliquent des cavités résonantes de dimensions inférieures au micromètre. Une utopie à une époque qui ignore tout, ou presque, des nanotechnologies. Le père de la théorie quantique, Niels Bohr, avait exprimé son incrédulité devant le caractère chimérique d'un maser émettant de la lumière visible.

Jeux de miroirs

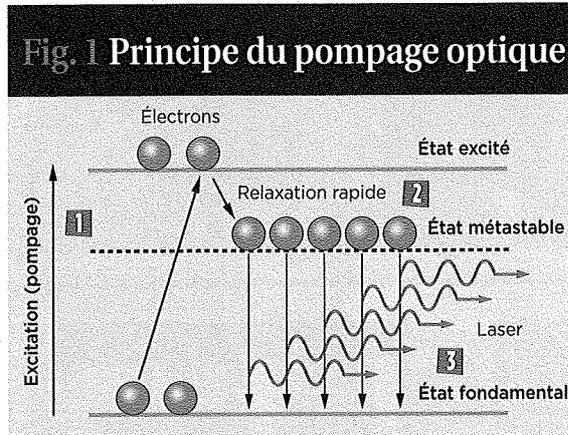
En 1957, Townes s'ouvre des difficultés rencontrées à un jeune doctorant de l'université Columbia,

1964

C'EST L'ANNÉE où le prix Nobel de physique, que partage Charles H. Townes avec les Soviétiques Bassov et Prokhorov, consacre l'invention quasi simultanée du maser par les équipes de l'université Columbia et de l'Institut Lebedev.

Gordon Gould. Trois semaines plus tard, celui-ci esquisse le schéma de principe d'un maser optique. Inspiré d'un dispositif conçu par les Français Charles Fabry et Alfred Perot, – l'interféromètre de Fabry-Perot –, l'appareil filtre des longueurs d'onde spécifiques tout en étant d'une taille raisonnable. Deux miroirs, disposés face à face, encadrent le milieu amplificateur. Les photons émis spontanément interagissent avec les atomes du milieu actif, déclenchant des émissions stimulées en cascade, favorisées par des allers et retours successifs entre les miroirs. Tous copies conformes les uns des autres, les photons se déplacent comme un banc de poissons sur l'axe des miroirs, l'un étant en partie transparent pour laisser émerger une fraction de la lumière. Le 13 novembre 1957, conscient de l'importance de sa découverte, Gould fait irruption dans une confiserie du Bronx, dont ●●●

●●● le propriétaire est un notaire auquel il confie son cahier de notes. Mais le jeune homme, persuadé de la nécessité de réaliser un prototype en état de marche, omet de déposer un brevet. Contrairement à Townes et Schawlow qui, plus au fait des pratiques en usage, décrivent quelques mois plus tard le principe de réalisation d'un appareil similaire dans la revue *Physical Review*(1). Le 22 mars 1960, le brevet américain US2929922A vient couronner leur travail théorique sur le maser optique, rebaptisé par la suite « laser », acronyme emprunté à un article de Gould intitulé « The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation », autrement dit « amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ». Gould ne réussira à faire reconnaître ses droits sur l'invention que près de trente ans plus tard, à l'issue d'une longue bataille juridique. L'article de Townes et Schawlow déclenche une course à la réalisation concrète d'un laser. Quel matériau utiliser pour favoriser l'émission stimulée ? Celle-ci est en compétition avec d'autres modes d'interaction de la lumière et des atomes, en particulier l'absorption : un photon incident a plus de chance d'être



1 Le pompage optique consiste à exciter des électrons occupant le niveau d'énergie le plus bas d'un atome (l'état fondamental). 2 Les électrons se retrouvent dans un niveau d'énergie supérieure (l'état excité), mais passent rapidement dans un état métastable qui devient peuplé. 3 Les électrons de l'état métastable se désexcitent en même temps, ce qui produit la radiation laser.

absorbé que d'engendrer un photon par émission stimulée. En juin 1959, lors d'un congrès d'électronique quantique près de New York, le problème avait été soulevé. Si la plupart des participants penchaient pour la mise en œuvre de milieux amplificateurs gazeux, le recours à des solides, comme le rubis, avait été évoqué. Rejetée par Schawlow, cette solution avait néanmoins retenu l'attention du physicien américain Theodore H. Maiman, des Hughes Research Laboratories, à Malibu, en

Californie. Bien qu'ayant préféré le voir se consacrer à « quelque chose d'utile », son laboratoire avait fini par lui accorder neuf mois, un budget de 50 000 dollars (contre plusieurs millions pour ses concurrents) et un assistant (à mi-temps) pour produire un laser à rubis.

Pureté exceptionnelle

Le 16 mai 1960, c'est chose faite : le laser est devenu réalité. Le dispositif complet tient dans la paume de la main. Le milieu amplificateur est un barreau de rubis synthétique de quelques millimètres de diamètre et quelques centimètres de longueur. Ses extrémités, soigneusement polies, sont recouvertes d'un film argenté. Une radiation rouge foncé, d'une longueur d'onde de 694,3 nanomètres, émerge de l'appareil et, même si la lumière obtenue est ténue, l'étroit faisceau dans lequel elle est concentrée est d'une pureté exceptionnelle. Pour peupler en permanence et de manière sélective les niveaux d'énergie élevée servant de base à la transition laser, Maiman a eu recours à la technique de pompage optique, imaginée en 1949 par le physicien alsacien Alfred Kastler et validée par son collègue Jean Brossel (Fig. 1). Sur les conseils d'un ami photographe, une lampe

QUAND LE LASER DEVINT MÉLOMANE

Le 15 avril 1981, à l'occasion du festival de Pâques de Salzbourg, le chef d'orchestre Herbert von Karajan, fervent adepte des nouvelles technologies, présente un prototype de disque compact audio numérique. Au milieu des années 1970, les ingénieurs de la compagnie Sony travaillaient sur le passage du son analogique au son numérique, tandis que leurs homologues de Philips s'intéressaient au développement de disques audio mettant en œuvre un faisceau laser et une lentille. Répondant

à l'invitation de Karajan, le Japonais Akio Morita, cofondateur de Sony, et son bras droit, Norio Ohga, tous deux mélomanes, avaient fait le voyage à Salzbourg et, sous la pression du chef d'orchestre, avaient décidé de faire équipe avec Philips.

En 1982, le premier CD de musique classique, *Une symphonie alpestre*, de Richard Strauss, dirigée par Karajan, voit le jour. Le diamètre de 12 cm aurait été imposé par Norio Ohga, désireux de faire tenir la *Symphonie n° 9* de Beethoven sur un



seul disque. Or la version la plus longue de l'époque, la version de référence, durait 74 minutes et 30 secondes. Une durée incompatible avec les disques de 11,5 cm et de 60 minutes préconisés par Philips.



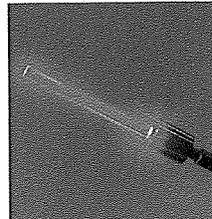
▲ Le physicien américain Theodore H. Maiman a conçu, avec très peu de moyens et malgré la défiance de sa hiérarchie, le tout premier laser en 1960.

flash enroulée en spirale autour du tube fournit l'énergie requise pour cette opération.

Dans la foulée, Maiman soumet un rapport à la revue *Physical Review Letters*, que les éditeurs rejettent : « Encore un énième papier sur les masers ! » Soucieux de battre le fer pendant qu'il est chaud, le physicien se tourne alors vers la revue britannique *Nature* qui, en août 1960, accepte de publier une note de 300 mots sur le sujet (3). Entre-temps, le 7 juillet, Maiman et les Hughes Research Laboratories avaient organisé une conférence de presse pour annoncer la réalisation « d'une source de lumière de température effective supérieure à celle du centre du Soleil ». La présentation de Maiman avait fait sensation, mais l'appareil émettait seulement par impulsions et non de manière continue. Quelques mois plus tard, un ancien élève de Townes, l'Irano-Américain Ali Javan, des laboratoires Bell, remédiera à ce problème en construisant un laser à

pompage électrique et à gaz, dont le milieu amplificateur est un mélange d'atomes de néon et d'hélium, ce dernier servant de catalyseur.

Ce laser est le premier produit et utilisé à grande échelle car, si le monde scientifique était en effervescence depuis l'invention de Maiman, celui de l'industrie l'était nettement moins. À quoi pouvait servir une telle invention ? Les premiers lasers étaient fragiles, chers, délicats à régler, et les entreprises peinaient à se procurer des rubis de bonne qualité. À ses débuts, le laser était surtout considéré comme un instrument exotique, une curiosité de laboratoire, tout juste bon à faire des trous dans de la tôle ou à réaliser des hologrammes dans les salons, une « solution en quête de problème », selon le mot d'Irnee D'Haenens, l'assistant de Maiman. « Laser à quoi, laser à rien », plaisantait-on. Depuis, grâce à des techniques et des matériaux nouveaux, des lasers de plus en plus élaborés ont vu le jour, couvrant un



▲ Dès les premières applications industrielles, les lasers ont investi le domaine médical, notamment pour traiter les cancers.

domaine spectral s'étendant des micro-ondes aux rayons X. Dans les années 1970, à la suite de la mise au point de diodes lasers, petites puces à base de semi-conducteurs, le laser a fait irruption dans les applications grand public.

Compactes, produites en masse à faible coût, les diodes lasers assurent la transmission de l'information par fibre optique, permettent la lecture des codes-barres et des disques compacts, équipent imprimantes et pointeurs optiques. Les lasers YAG (pour grenat d'yttrium-aluminium) ont, quant à eux, investi le domaine médical et paramédical. Des lasers à colorants, dits « accordables », produisent des teintes à la demande, grâce à un milieu amplificateur constitué de molécules organiques avec une multitude de niveaux d'énergie. Capables de délivrer des puissances instantanées phénoménales et des impulsions ultra-brèves, et de concentrer un maximum d'énergie dans un espace minimal, les lasers ont ouvert de nouveaux champs d'investigation, permettant le suivi des réactions chimiques en temps réel ou la reproduction à petite échelle des conditions physiques régnant au cœur des étoiles. Détecter les ondes gravitationnelles, piéger et manipuler les atomes, traquer les polluants de l'atmosphère, photographier les virus et déchiffrer la composition moléculaire des cellules ne relèvent plus de l'utopie. De la physique des particules à celle du vide, de l'optique quantique à la cosmologie, la recherche fondamentale, à l'origine du développement du laser, a bénéficié, par un juste retour des choses, des avancées de l'invention à laquelle elle avait donné naissance. ■

(1) A. Einstein, *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121, 1917.

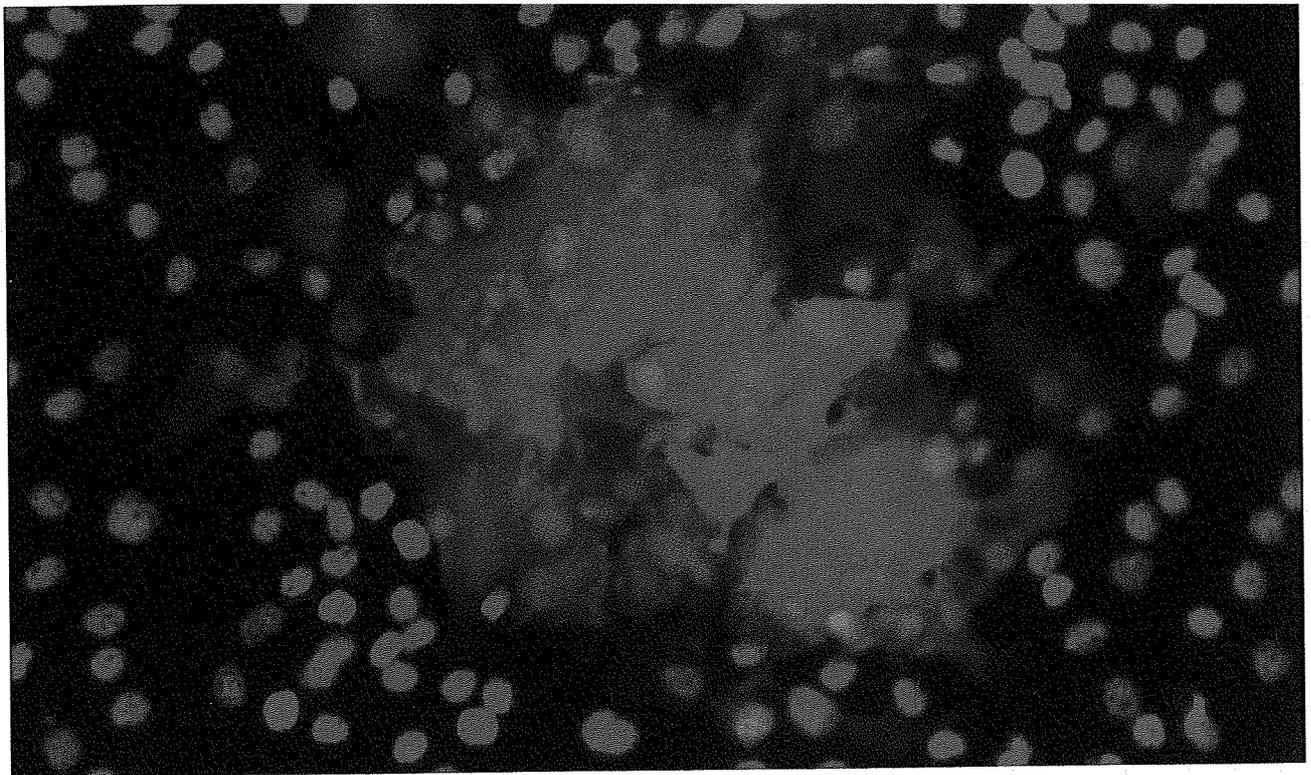
(2) A. L. Schawlow et C. H. Townes, *Phys. Rev.*, 112, 1940, 1958.

(3) T. H. Maiman, *Nature*, 187, 493, 1960.

CES VIRUS QUI NOUS SAUVENT

Utiliser des virus pour tuer des cellules cancéreuses, ce concept ancien tombé aux oubliettes renaît de ses cendres. Avec des résultats étonnants.

Mathias Germain, journaliste



Stacy Erholtz est une miraculée. Cette Américaine de 52 ans se bat depuis plus de dix ans contre le « myélome multiple ». Ce cancer du sang touche une variété de globules blancs, les plasmocytes, des cellules du système immunitaire qui sont produites par la moelle osseuse. Les plasmocytes malades prolifèrent, forment des tumeurs dans les os et déstabilisent les défenses de l'organisme. Ce cancer particulièrement agressif est

souvent résistant aux traitements. C'est le cas chez cette patiente: malgré plusieurs chimiothérapies et deux transplantations de cellules souches de moelle osseuse, la maladie reprend le dessus à chaque fois.

Les tumeurs se disséminent sur son front, son sternum, ses clavicules, sa colonne vertébrale... lorsqu'elle entend parler, en 2012, des travaux conduits par Stephen Russell, hématologue à la Mayo Clinic de Rochester, aux États-Unis. Ce spécialiste des cancers du sang travaille ●●●

▲ *Après l'injection du virus de la rougeole, les cellules cancéreuses commencent à être infectées (en vert), pour mourir ensuite, ce qui provoque l'activation du système immunitaire.*

●●● depuis plusieurs années sur un traitement à base de virus atténués (*) de la rougeole. Des virus qui servent habituellement à la vaccination. En 2013, son équipe est prête à lancer une première expérimentation chez l'homme. Décidée à lutter jusqu'au bout, Stacy Erholtz se porte volontaire. Et, au mois de juin de cette année-là, elle est l'une des deux premières malades à tester le traitement.

Installée dans le service d'hématologie, elle reçoit en moins d'une heure plus de 100 milliards de virus atténués par perfusion, une dose suffisante pour vacciner dix millions de personnes. Un choc pour l'organisme! Rapidement, sa température franchit le seuil des 40 °C. Pendant près de quatre heures, elle vomit, tremble et souffre d'un terrible mal de tête. Elle passe ensuite plusieurs jours clouée au lit avant que la douleur ne s'atténue. Pendant les semaines qui suivent, elle reste sous surveillance médicale. Grâce à une manipulation génétique (on incorpore dans l'ADN du virus un gène qui code un transporteur d'iode), les virus sont visibles par scintigraphie, une technique d'imagerie médicale. Ainsi, les médecins peuvent observer leur progression dans les tumeurs. Plusieurs jours après l'intraveineuse, ils constatent que toutes les tumeurs sont détruites (1). Aucun autre effet secondaire n'est à déplorer. Stacy Erholtz semble en rémission complète.

(*) **Un virus atténué** est un virus vivant qui a perdu une part de son pouvoir pathogène.

LE SYSTÈME IMMUNITAIRE RENFORCÉ PAR LE VIRUS DU SIDA INACTIVÉ

Les virus sont utilisés comme des agents antitumeurs, mais ils peuvent aussi servir à rééduquer des cellules immunitaires, comme les lymphocytes T. L'idée est de transférer un gène, par l'intermédiaire d'un virus du sida inactivé, dans un lymphocyte pour qu'il devienne actif contre des cellules cancéreuses spécifiques. Cette technique de thérapie génique a été testée par Carl June, de l'hôpital pour enfants de Philadelphie, aux États-Unis, qui l'a expérimentée en 2011 sur trois patients atteints de leucémie chronique (1). Il a ainsi prélevé près d'un milliard de lymphocytes T du malade, puis il les a mis en contact avec des virus du sida inactivés. Ces virus ont été modifiés afin de porter un gène qui code un récepteur capable de reconnaître une protéine spécifiquement présente à la surface des lymphocytes T. Ces virus, naturellement habiles à pénétrer les cellules du système immunitaire comme les lymphocytes T, intègrent le gène dans ces cellules. Les lymphocytes deviennent alors capables de cibler les cellules cancéreuses. Réinjectés au malade, ils peuvent les combattre efficacement, tout en relançant l'ensemble du système immunitaire. Dans cette stratégie, les virus inactivés n'ont aucun contact direct avec le malade.

(1) D. L. Porter *et al.*, *NEJM*, 365, 725, 2011.

Que s'est-il passé dans ses tumeurs? L'explication tient en une formule: CD46. CD46 est le nom d'un récepteur, une protéine implantée dans la membrane des cellules humaines. Ce récepteur permet à la cellule d'inhiber le système immunitaire dit « inné »: il évite qu'elle fasse l'objet d'une attaque accidentelle des molécules qui veillent à la sécurité de notre organisme. Le problème est que cette propriété est détournée par certaines cellules cancéreuses. Celles-ci présentent 100 à 1 000 fois plus de récepteurs CD46 que les cellules saines, ce qui leur permet de rester invisibles pour les défenses de l'organisme et de proliférer en toute tranquillité.

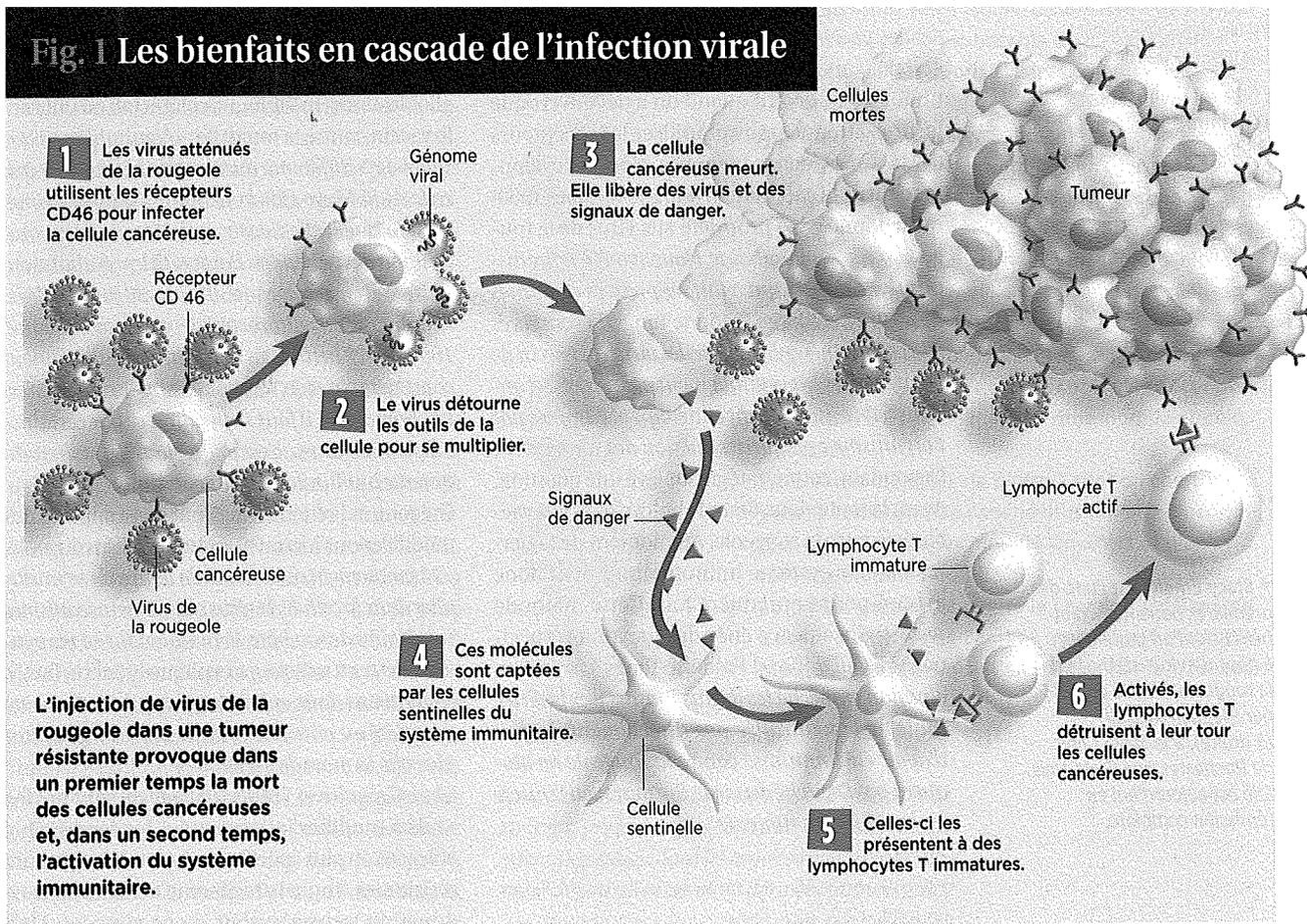
DES CIBLES EXCLUSIVES

En 1993, les progrès de la biologie moléculaire ont permis à deux équipes, dont celle de Denis Gerlier, en France, de découvrir que le récepteur CD46 est aussi, pour les virus de la rougeole, et plus spécifiquement pour les virus atténués utilisés dans le cadre de la vaccination, une porte d'entrée dans une cellule. Une protéine du virus, la protéine H, interagit avec le récepteur CD46 et permet l'infection de la cellule. Ce qui faisait la force des cellules cancéreuses devient leur point faible. Les cellules cancéreuses ont beaucoup plus de portes d'entrée pour le virus atténué de la rougeole que les cellules saines.

Une fois à l'intérieur de la cellule tumorale, le virus de la rougeole fait naturellement ce qu'il sait faire: se servir des protéines et des organes de la cellule pour se répliquer. Cette action provoque la mort de la cellule cancéreuse, pendant que les répliques du virus vont infecter les cellules cancéreuses contiguës... L'infection se propage ainsi au sein de la tumeur, mais très peu vers les cellules saines. Faut-il beaucoup de virus pour détruire une tumeur? On considère qu'il faut une particule virale par cellule tumorale. Donc, si on estime que les tumeurs représentent dix milliards de cellules, on injecte une dose équivalente de virus.

Le recours à ces virus présente un deuxième avantage: il réactive le système immunitaire contre les tumeurs résistantes. Plus précisément, la destruction de cellules cancéreuses par les virus relance les mécanismes de défense dits « adaptatifs », ceux qui, après la reconnaissance d'un agent pathogène, sont capables d'apporter une réponse spécifique. En effet, lorsque la

Fig. 1 Les bienfaits en cascade de l'infection virale



membrane de la cellule cancéreuse est en cours de destruction, des signaux moléculaires sont largués dans l'organisme. Ces signaux de danger sont alors détectés et intégrés par les cellules sentinelles du système immunitaire, les cellules dendritiques. Ces dernières transmettent ces signaux moléculaires à des cellules immunitaires naïves, des lymphocytes T activés. Celles-ci deviennent alors des cellules tueuses spécifiquement adaptées contre les cellules cancéreuses, car elles possèdent les récepteurs capables de les reconnaître. Au final, les cellules cancéreuses sont les cibles exclusives de deux adversaires, les virus de la rougeole et les lymphocytes T (Fig. 1). Dans le cas de Stacy Erholtz, la stratégie s'est révélée payante. Les plasmocytes cancérogènes sont détruits. Totalemment ? Manifestement non : neuf mois après ce traitement massif, une tumeur s'est formée au niveau du front. Heureusement, elle disparaît grâce à la radiothérapie.

Aux dernières nouvelles, Stacy Erholtz est en rémission, et elle mène campagne pour lever des fonds afin d'accélérer le développement de ce traitement encore expérimental. Utiliser des virus de la rougeole pour tuer des cellules cancéreuses ? Le concept peut surprendre. D'autant que certains cancers sont initiés par des virus : les papillomavirus sont responsables des cancers du col de l'utérus, les virus de l'hépatite C et B de certains cancers du foie. Aujourd'hui, les cancérologues estiment que 15 % des cancers sont déclenchés par des virus. « *Cependant, l'idée d'utiliser des virus est ancienne* », rappelle Frédéric Tangy, virologue à l'Institut Pasteur. Depuis une dizaine d'années, ce dernier travaille sur ce concept avec Marc Grégoire, chercheur en cancérologie à l'Inserm. Dans les années 1970, des médecins ont décrit un cas de régression spontanée d'un lymphome chez un jeune ayant été infecté par le virus de la rougeole. Cette ●●●

(*) **Une souche de virus** est une sous-catégorie dans une même famille de virus.

(*) **Le métabolisme cellulaire** est l'ensemble des mécanismes chimiques qui permettent la croissance et la multiplication de la cellule.

▼ *Stacy Erholtz est l'une des premières patientes ayant bénéficié d'un traitement à base de virus atténués de la rougeole, réalisé en 2013 par Stephen Russell (à droite), à la Mayo Clinic de Rochester, aux États-Unis. Elle est aujourd'hui en rémission complète.*



... observation a été à l'origine de l'idée d'utiliser des vaccins antiviraux comme traitement de certains cancers (2). Mais cette méthode a connu un tournant décisif quand on a découvert que le virus atténué pouvait utiliser les récepteurs CD46. Coïncidence heureuse, c'est le développement de la vaccination (dans les années 1960) qui a donné cette propriété aux virus de la rougeole. « C'est une aubaine. Nous avons à notre disposition un outil qui a fait ses preuves en termes de sécurité, souligne Frédéric Tangy. Et comparés à la chimiothérapie répétée, les virus du vaccin de la rougeole n'ont pratiquement pas d'effets secondaires. En outre, ils sont entièrement éliminés par l'organisme après la destruction des tumeurs. » Cependant, cette stratégie soulève une question. Avant le traitement, Stacy Erholtz n'était pas vaccinée contre la rougeole. Au moment de la perfusion, son système immunitaire y était donc exposé pour la première fois. Cette méthode reste-t-elle efficace chez des personnes vaccinées ? « Oui, répond Frédéric Tangy, car la vaccination empêche les dégâts induits par le virus, mais ne le neutralise pas directement. Le fait d'avoir été immunisé contre la rougeole ne bloquera pas l'activité du virus. Surtout si on l'injecte à proximité des tumeurs. »

Convaincu de cette méthode, il recherche des fonds pour lancer, avec Marc Grégoire, un essai clinique sur un ou plusieurs cancers (poumon, glioblastome, mélanome, colorectal) en utilisant le vaccin contre la rougeole. « Nous utilisons une souche (*) différente du virus de la rougeole que celle de la Mayo Clinic, explique Marc Grégoire. C'est la souche Schwartz, qui entre dans la composition des vaccins en Europe. Et les résultats sont tout aussi encourageants. In vitro, 30 % des cellules cancéreuses en culture sont détruites en 24 heures, 100 % en 72 heures (3). Cela dit, dans une tumeur cancéreuse in vivo, la population de cellules n'est pas homogène, il faut s'attendre à ce que certaines soient résistantes, c'est là que la réactivation du système immunitaire est intéressante. » Mais Marc Grégoire et Frédéric Tangy ont aussi apporté des modifications à leur virus atténué de la rougeole. « Normalement, pour avoir le temps de se multiplier dans la cellule, le virus stoppe les mécanismes suicidaires de son hôte, la maintenant en vie pendant deux ou trois jours, explique Frédéric Tangy. Nous avons donc enlevé le gène qui confère cette propriété au virus. De cette façon, le virus induit plus vite la mort de la cellule. »

Marc Grégoire et Frédéric Tangy ne sont pas les seuls à modifier les virus pour les rendre plus efficaces ou plus spécifiques à certaines tumeurs résistantes. Toute la recherche actuelle dans ce domaine tourne autour de ce concept. Une équipe du centre de recherche en cancérologie de Toulouse a récemment démontré l'efficacité d'un virus de l'herpès contre des cellules du cancer du pancréas (4). « Ce virus n'est pas spécifique au pancréas, explique Pierre Cordelier, responsable des recherches. Il peut être utilisé dans le gliome, le glioblastome, le mélanome. Mais dans les tumeurs du pancréas, il existe un environnement moléculaire particulièrement propice à sa réplication. » Une bonne nouvelle, car ces cancers sont très résistants aux traitements. « Les cellules cancéreuses pancréatiques s'adaptent aux traitements et modifient considérablement leur métabolisme cellulaire (*), explique Pierre Cordelier. Mais ce qui fait leur force contre la chimiothérapie peut devenir leur talon d'Achille pour les virus de l'herpès. En effet, les mécanismes de chimiorésistance sont aussi très bénéfiques pour la propagation de ce virus. »

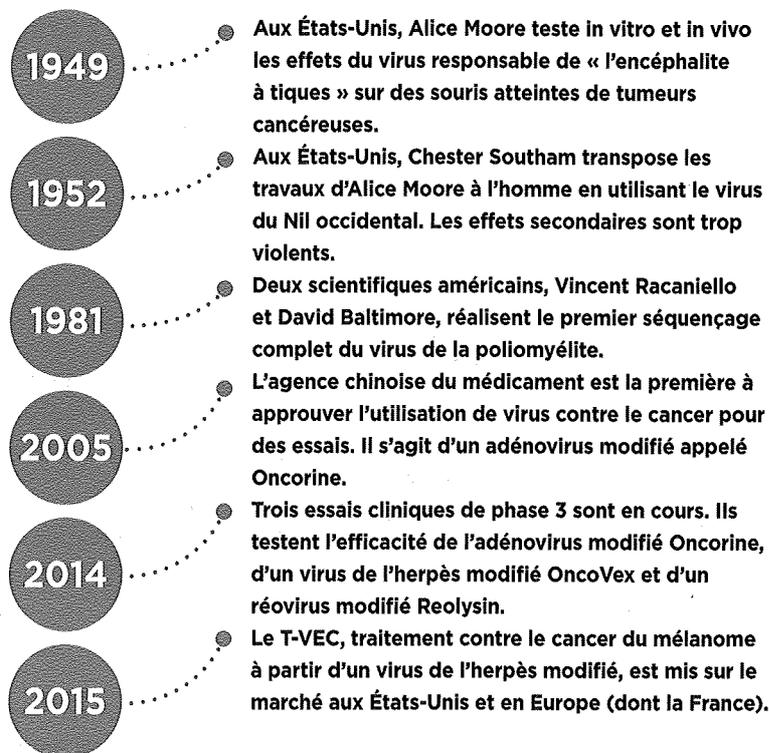
Comment cela fonctionne-t-il ? Pour cette expérience, le virus de l'herpès a été génétiquement modifié. Par mesure de sécurité, les chercheurs

ont retiré certains gènes responsables de sa virulence. Parmi eux, ont été supprimés les gènes qui codent une enzyme, la ribonucléotide réductase, nécessaire à sa réplication. Ainsi, ces virus ne pourront proliférer que dans des cellules présentant une forte activité de protéines de la même famille. C'est le cas des cellules cancéreuses pancréatiques qui, pour résister à la chimiothérapie, surexpriment les ribonucléotides réductases 1 et 2, deux protéines humaines « cousines » de la protéine virale.

LES MEILLEURS ALLIÉS DES MALADES

Autre modification importante dans les premières générations de ces virus, l'ablation de la protéine virale 34.5, essentielle pour « parasiter » la cellule hôte et favoriser la réplication. Ces virus ont été testés *in vivo*; leur sécurité a été démontrée, mais leur efficacité était plus discutable. Pour ces raisons, les chercheurs ont décidé de réintroduire la protéine 34.5, mais en contrôlant son expression par des molécules spécifiques des cellules cancéreuses pancréatiques. Résultat, ces virus gagnent en agressivité contre les tumeurs, tout en épargnant les cellules saines. « *In vitro*, les cellules sont tuées dans un délai très court, entre trois et six jours, constate Pierre Cordelier. *In vivo*, chez les souris, les tumeurs sont considérablement réduites au bout de quinze jours. L'avantage avec le virus de l'herpès, c'est qu'il a un cycle viral rapide, beaucoup plus rapide que celui de la grippe, qui a aussi été testé contre le cancer du pancréas. » Les combinaisons virus et immunothérapie font déjà l'objet d'essais cliniques et les premiers résultats sont très positifs. Pierre Cordelier et son équipe étudient cette combinaison avec d'autres souches virales, mais toujours dans le cancer du pancréas. « *Notre travail préclinique a démontré l'intérêt thérapeutique de combiner l'utilisation du virus et de la chimiothérapie de référence. Une combinaison avec laquelle nous avons obtenu des résultats spectaculaires. Nous essayons désormais de déterminer quelle est la meilleure séquence de traitement afin d'obtenir un effet optimal.* »

En outre, son équipe continue encore de décrypter les mécanismes moléculaires qui induisent la mort cellulaire. « *C'est un domaine passionnant!* », s'enthousiasme Pierre Cordelier, qui n'a que très rarement constaté d'effets aussi encourageants depuis une dizaine d'années de recherche en



cancérologie. « *C'est amusant de voir qu'un vieux concept, pressenti au début du XX^e siècle, et testé scientifiquement dans les années 1950, a été totalement dépoussiéré ces vingt dernières années grâce à la génomique et aux connaissances de la biologie moléculaire. Ce qui est aussi positif avec l'utilisation des virus, c'est que la recherche se recentre sur la cellule cancéreuse, son mode de fonctionnement, pour une approche plus rationnelle de la prise en charge de la maladie.* »

À travers le monde, une vingtaine d'équipes travaillent sur l'utilisation des virus en cancérologie. Les virus de la rougeole, de l'herpès mais également les adénovirus, les parvovirus, et le virus du sida (lire l'encadré p. 88) sont l'objet de toutes les attentions des chercheurs qui les rendent plus spécifiques. Si cela continue, ces virus initialement pathogènes pourraient devenir les meilleurs alliés des malades. Ils le sont déjà pour les chercheurs. Quant à Stacy Erholtz, elle est venue soutenir la virothérapie lors du premier congrès international dans le domaine qui s'est déroulé à Oxford en mai 2018. ■

(1) S. J. Russell *et al.*, *Mayo Clin. Proc.*, 89, 926, 2014.

(2) G. Pasquinnuci *et al.*, *Lancet*, 1, 136, 1971.

(3) J.-B. Guillerme *et al.*, *Clin. Cancer Res.*, 19, 1147, 2013.

(4) M. Gayral *et al.*, *Human Gene Therapy*, 26, 104, 2015.

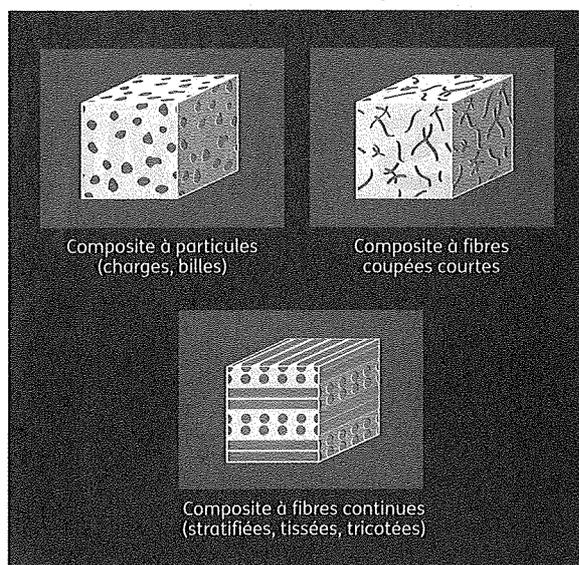
Les composites en quête de recyclabilité

Les matériaux composites connaissent un formidable essor qui pose la question de leur recyclage. Un enjeu majeur pour la filière industrielle, mais complexe. Plusieurs pistes technologiques, plus ou moins avancées, sont explorées afin de mieux les valoriser.

Les matériaux composites, soit l'association d'une matrice polymère et d'un renfort (fig. 1), ont démontré de longue date leurs avantages concurrentiels, tant en termes de performance-masse des matériaux que de performance-coût de fabrication, ou encore pour la liberté de design qu'apportent ces nouvelles matières. Ces qualités exceptionnelles expliquent leur taux croissant de pénétration dans des secteurs d'activité variés (bâtiment, transport automobile, ferroviaire, aéronautique et spatial, énergie, sport et loisirs...). Leur production mondiale s'élevait à près de 10 millions de tonnes en 2016, dominée à 95% par les plastiques renforcés de fibres de verre (courtes, longues ou continues, sous forme de rovings, tissus ou mats). Cependant, ce sont les composites à renfort en carbone, notamment pour leur ratio performance-poids permettant d'alléger les pièces, et les composites à matrice thermoplastiques, pour leur recyclabilité potentielle et leur facilité de mise en forme, qui connaissent les plus fortes progressions à l'échelle mondiale. La conséquence de cette évolution est l'augmentation des flux de déchets de production et de produits en fin de vie, qu'il faut gérer aujourd'hui ou dans les prochaines années.

Cette nécessité du recyclage, de la valorisation et de l'élimination peut être considérée comme une contrainte, notamment réglementaire. Mais elle peut aussi être perçue comme une opportunité économique, grâce à l'utilisation de matières premières secondaires, écologique, de par la réduction de l'empreinte carbone, et sociale, avec la création de nouvelles activités non délocalisables. Cette problématique constitue donc un enjeu majeur de la filière industrielle des plastiques et des composites, mais également des pouvoirs publics (européens, nationaux et régionaux). Au-delà de ces aspects environnementaux et économiques, le recyclage se décline dans de nombreux défis techniques, industriels

FIG. 1
Différentes structures de composites



Les composites désignent des matériaux constitués d'une matrice, généralement en polymère thermodurcissable ou thermoplastique, et d'un renfort particulaire ou fibreux, souvent en verre ou en carbone.

et organisationnels dignes d'intérêt pour la communauté scientifique. On peut distinguer trois procédés de recyclage des composites : mécaniques, chimiques et thermiques.

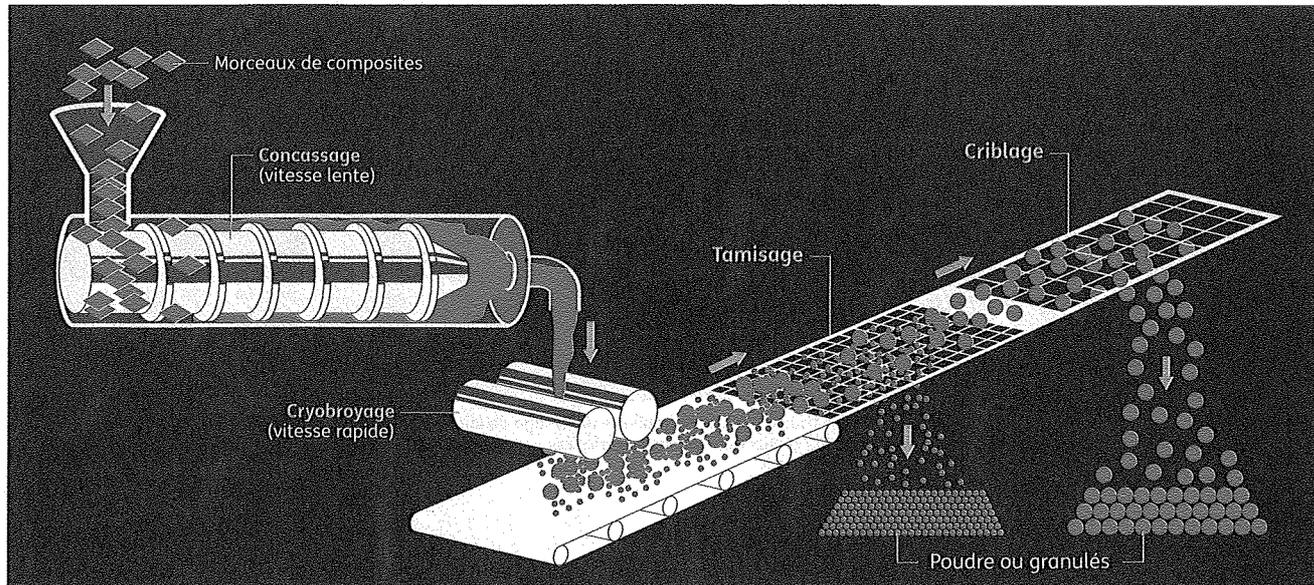
1. BROYAGE

Les procédés mécaniques

Les procédés mécaniques comprennent deux phases : la réduction de la taille de l'objet à recycler par broyage, puis l'incorporation de ce broyat dans un nouveau matériau (composite ou autre), comme additif ou comme charge (fig. 2). Ces procédés, relativement aisés à mettre en œuvre et ne nécessitant pas de lourds investissements, permettent de traiter les gisements les plus larges, en particulier les composites contenant des fibres de verre, mais aussi des fibres de carbone hautes performances ou naturelles, tant à matrice thermodurcissable - principalement polyesters - qu'à matrice thermoplastique issue des chutes de production.

Le broyage est généralement réalisé en deux temps. Il commence par un concassage préliminaire grossier à faible vitesse sur le site de collecte, avec une taille de broyat de l'ordre de 50 à 100 mm, pour réduire les encombrements de pièces et les volumes à transporter, et optimiser les coûts de transport. Il est suivi d'un broyage à grande vitesse, sur le site de traitement, pour atteindre des tailles plus faibles, de l'ordre de 50 μ m à 10 mm. Différents types de déchiqueteurs-broyeurs, à marteaux ou à percussion, peuvent

FIG. 2
Action mécanique de concassage, broyage, tamisage et criblage



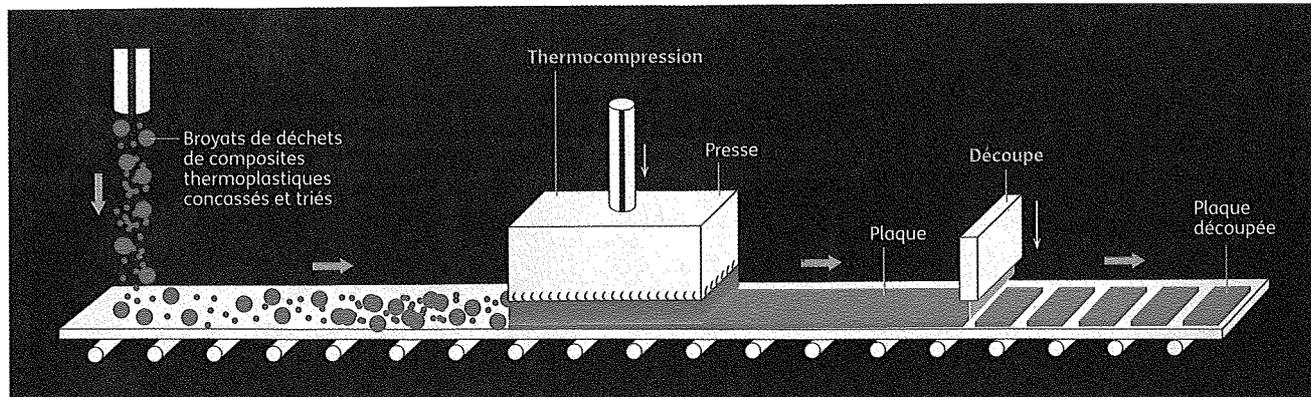
Le procédé mécanique consiste à broyer les pièces composites en fin de vie afin d'obtenir des morceaux de petites dimensions qui seront réincorporés dans une nouvelle matrice. Le broyage à basse température est privilégié pour ne pas porter atteinte aux propriétés mécaniques de la matière.

être utilisés en fonction de la nature du composite. La réduction de taille peut être effectuée à basse température (cryobroyage) pour réduire l'échauffement du matériau induit par le broyage, limitant ainsi la dégradation thermomécanique des différents constituants du composite et des éléments du broyeur.

Une fois les opérations de concassage-broyage achevées, c'est le tour du criblage : l'élimination des résidus de trop grande taille, pouvant générer, après incorporation dans le nouveau matériau, des points de faiblesse mécanique non admissibles pour certaines applications. Puis viennent le tamisage, pour séparer les différentes classes granulométriques, et la séparation par flottaison, ou techniques électrostatiques. Cette étape permet d'isoler les fractions

riches en fibres, avec des longueurs de 20 mm, et celles riches en matrice, c'est-à-dire avec des tailles de particules inférieures à 100 µm, qui peuvent avoir des flux de valorisation différents. Les différents recyclats obtenus peuvent être réincorporés dans un nouveau matériau, comme éléments de renforcement pour les fractions riches en fibres, ou comme additifs dans le cas des fractions riches en matrice. Dans le premier cas, que la matrice soit thermoplastique ou thermodurcissable, renforcée fibre de verre, carbone ou végétale, il est important de noter que le pouvoir de renforcement mécanique est significativement diminué par rapport à celui du renfort initial. En cause, la dégradation des constituants lors des traitements de broyage, la difficulté à disperser le recyclat dans le polymère hôte et la faible compatibilité du recyclat et du matériau hôte, et ce même si une optimisation des conditions de compoundage ou de mélangeage et des formulations spécifiques peuvent limiter ces derniers effets. En conséquence, les taux de substitution admissibles sont relativement faibles, entre 5 et 30%. Le projet Alterval Composites consiste, par exemple, en la réintroduction de broyats de composites thermodurcissables dans une matrice thermoplastique pour la fabrication de produits de substitution au bois ou au béton. Néanmoins, de nouveaux procédés tels que Thermosaic (Cetim-Ceremat) (fig. 3), utilisant des broyats de composites à matrice thermoplastique de taille importante, permettent de conserver des longueurs de fibres nettement plus grandes, de 30 à 200 mm, et conduisent à »

FIG. 3
Procédé Thermosaïc



Ce procédé dédié au retraitement des composites à matrice thermoplastique implique une étape de chauffage et de compression supplémentaire. Cette méthode produit des panneaux avec des renforts de fibres aux dimensions supérieures par rapport aux autres procédés mécaniques.

» la fabrication de panneaux consolidés dont la résistance est cinq à dix fois supérieure à celle du déchet dont il est issu. Ces recyclats peuvent aussi être incorporés à d'autres matières qu'une matrice polymère et recyclés dans d'autres filières (caoutchoucs, céramiques de friction, enrobés routiers, bétons de dallage...). En la matière, les initiatives menées depuis plus de trente ans sont très nombreuses, le défi restant l'identification de débouchés applicatifs et la viabilité économique de l'opération.

Dans certains cas, l'utilisation de ces recyclats comme additifs apporte une valeur ajoutée et optimise ainsi le prix de vente. C'est l'intérêt des travaux menés par le consortium transfrontalier Recy-Composite. Leur objectif est de substituer un recyclat de thermoplastiques renforcés de fibres de verre (pièces automobiles) à une formulation thermoplastique intumescence standard. Pour certains couples de matrices (recyclée et hôtes), la faisabilité du concept a été démontrée. De plus, son efficacité peut s'avérer supérieure à celle de formulations intumescences standard, avec une réduction très significative de la vitesse de perte de masse et de la quantité totale de chaleur et de fumées dégagées.

2. DISSOLUTION

Retour au monomère

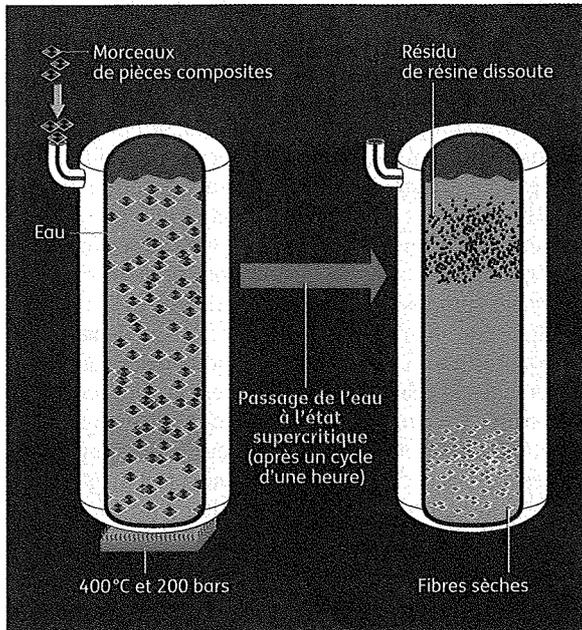
Les procédés chimiques de recyclage regroupent différentes variantes de solvolyse (fig. 4). Cette opération consiste en une dépolymérisation de la matrice dans un solvant à haute température (180 à 300°C) sous pression autogène et température contrôlée. Les fractions inorganiques (fibres, charges minérales) sont réutilisables comme charges et renforts pour de nouveaux composites. En fonction du solvant utilisé, on parlera de glycolyse, acidolyse, hydrolyse... La fraction liquide (solvant et produits de dépolymérisation)

est potentiellement valorisable pour l'industrie chimique. Ces procédés peuvent permettre un recyclage intégral du composite. Ils sont bien développés techniquement pour les composites à matrices thermoplastiques, mais encore à l'état de recherche pour les composites à matrices thermodurcissables, c'est-à-dire stables et réticulées, car il est impossible de revenir au monomère initial. Les groupements chimiques valorisables issus de la matrice dépendent de la composition du composite initial et du solvant, mais peuvent être utilisés pour la synthèse d'une nouvelle matrice thermodurcissable ou d'un additif.

Enfin, les conditions opératoires (pression, température, agitation, durée, solvant) doivent être parfaitement contrôlées et adaptées à chaque type de matrice, nécessitant un tri à la source rigoureux. En fonction de la nature chimique de la matrice, les solvants adaptés existent ou non, peuvent ou non poser des problèmes en termes d'hygiène et de sécurité et/ou de leur propre recyclage. Les projets Aerdec et Eurecomp ont démontré la faisabilité du recyclage de composites à fibres de carbone issues de l'aéronautique par solvolyse à haute température sous eau supercritique, pour la récupération de fibres sèches.

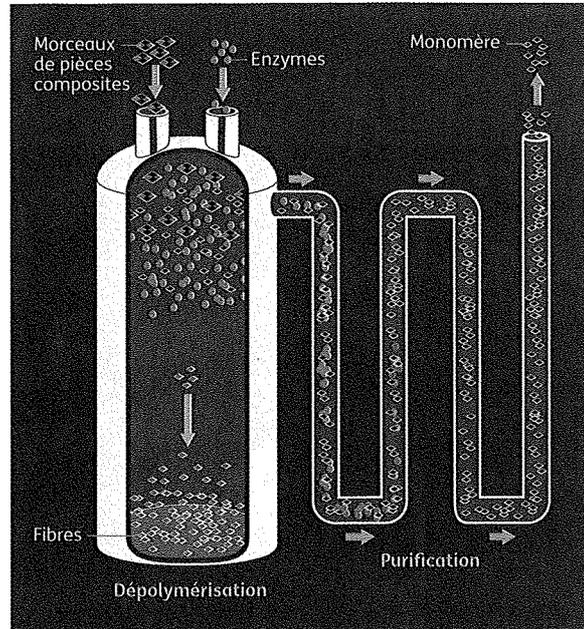
Apparentés aux procédés chimiques, les procédés biologiques (fig. 5), tels que le recyclage enzymatique, ont été développés, à l'instar du procédé Carbios, pour des polymères thermoplastiques à base amidon ou de type PLA (acide polylactique) et PET (polyéthylène téréphtalate), et certains polyamides. Le principe repose sur la dépolymérisation enzymatique de certains polymères, conduisant à la possible récupération des monomères et à leur réintroduction dans la chaîne de fabrication des plastiques. Bien qu'elle soit encore limitée à certains matériaux de base, il est envisageable de tirer parti, à terme, de cette technologie pour le recyclage de composites à matrices thermoplastiques.

FIG. 4
Solvolyse



Des morceaux de composites sont placés dans de l'eau et soumis à une pression de 200 bars et à une température de 400°C. Au bout d'une heure, l'eau passe à l'état supercritique et dissout la matrice polymère. Le cycle terminé, on obtient des fibres et de la résine.

FIG. 5
Traitement enzymatique



Les composites sont placés dans une cuve avec des enzymes capables de casser les chaînes moléculaires du polymère. L'étape de purification permet de séparer les enzymes du monomère, qui pourra être réutilisé pour la fabrication d'un polymère vierge.

3. INCINÉRATION

Un potentiel énergétique

Différents procédés thermiques peuvent être mis en œuvre. Le plus ancien est l'incinération (le taux d'incorporation est voisin de 10% dans un flux d'ordures ménagères ou de déchets industriels banals). Le traitement est réalisé en deux à trois heures, dans un four, entre 400 et 1000°C. Certains résidus peuvent être utilisés en génie civil. L'incinération tend toutefois à disparaître avec le renforcement des contraintes réglementaires et environnementales.

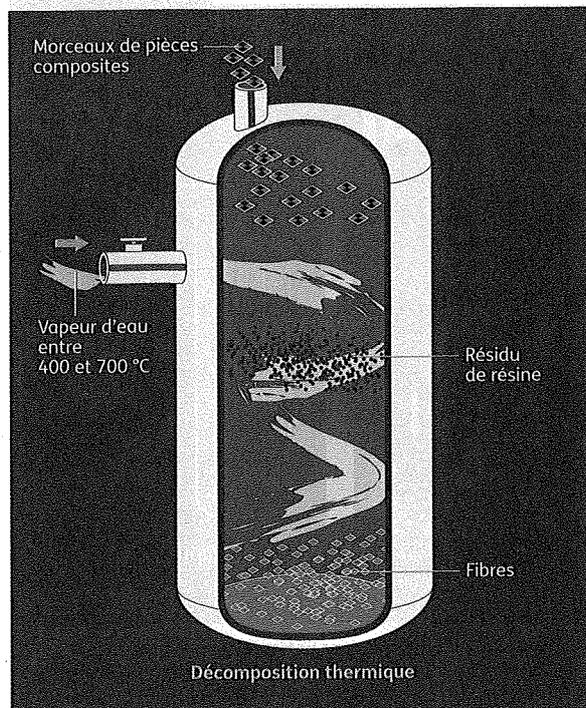
Après déchetage et broyage, les matériaux renforcés de fibres de verre, dont la partie organique apporte une forte capacité calorifique, peuvent être traités en cimenterie et valorisés énergétiquement. La partie minérale, c'est-à-dire les fibres et les charges, peut également être valorisée sous forme de matière première secondaire en tant qu'éléments de formulation du béton. La co-incinération en cimenterie offre l'avantage d'absorber rapidement des volumes importants de composites à recycler et de ne pas générer de résidus. En revanche, cette voie n'est pas adaptée au traitement des composites à fibres de carbone. Le procédé Compocycle, développé par Zajons et Holcim, permet par exemple de récupérer des déchets composites afin de les valoriser en cimenterie.

Les procédés de pyrolyse-thermolyse recourent à une décomposition thermique (entre 400 et 700°C) des matières organiques, en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène, pour séparer les constituants. Les fibres récupérées lors de ce processus sont réemployées dans la production de renforts à fibres courtes ou de mats réintégrables dans de nouveaux composites. La matrice, quant à elle, est récupérée sous la forme d'un résidu solide ou gazeux qui sera valorisé, selon le cas, dans les filières de production d'énergie ou en tant que composé de base pour l'industrie chimique.

Le principe de la vapo-thermolyse (fig. 6), breveté, développé en France par Alpha Carbone, est une variante de la thermolyse où le procédé est catalysé par de la vapeur d'eau. Ceci permet d'assurer des transferts thermiques plus efficaces. Un bémol toutefois, même si ces procédés peuvent être appliqués aux composites à fibres de verre, ces fibres sont nettement dégradées lors du traitement. Leurs performances mécaniques sont fortement diminuées, avec une chute de 50% de la résistance spécifique. En revanche, ces procédés sont bien adaptés au recyclage des composites à fibres de carbone, moins sensibles aux hautes températures. Les fibres obtenues en bout de chaîne présentent un taux de conservation des performances mécaniques supérieur à 95%.



FIG. 6
Vapothermolyse



Ce procédé consiste à décomposer la matrice sous l'action d'une vapeur d'eau chauffée entre 400 et 700 °C, dans une cuve sous vide. Il convient davantage aux fibres de carbone qu'aux fibres de verre dont il détériore fortement les propriétés.

» 4. RÉEMPLOI

La piste privilégiée

La gestion des déchets composites est un vaste sujet, qui peut être abordé de différentes façons. Mais elle reste délicate en raison de la nature des matériaux. Leurs constituants sont plus ou moins sensibles à la dégradation thermique, chimique ou mécanique induite par les procédés de traitement. De plus, le polymère et le renfort, d'autres éléments comme des additifs ou des inserts métalliques peuvent être ajoutés à la pièce. Pour les pièces industrielles en fin de vie, l'obtention de gisements clairement identifiés, stables et homogènes n'est pas évidente, ce qui ne favorise pas la rentabilité économique du traitement.

La réglementation européenne sur la gestion des déchets s'applique aux pièces composites. Elle a défini des principes généraux, traduits en termes de hiérarchie de traitement des déchets ou ordre de priorité à considérer pour préserver les ressources et l'environnement. Si la génération du déchet n'a pu être évitée (c'est le cas des pièces industrielles qui répondent à un réel besoin fonctionnel), il convient de privilégier, dans l'ordre, la réuti-

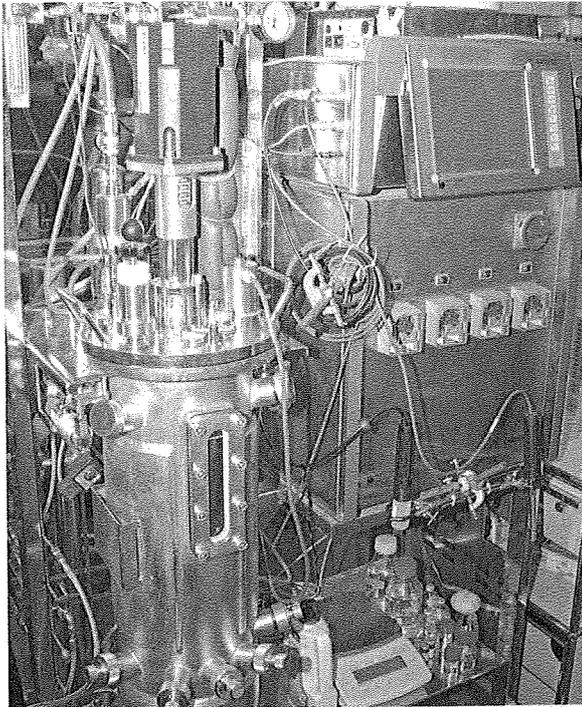
lisation (remise sur le marché en l'état, éventuellement après réparation), le recyclage, c'est-à-dire le traitement du déchet de façon à le réintroduire dans la chaîne de production initiale (dans la même fonction ou dans une autre fonction), la valorisation, c'est-à-dire le traitement du déchet de sorte qu'il soit utilisable en substitution à d'autres composants ou substances, et enfin l'élimination (par exemple, par incinération sans valorisation énergétique ou stockage) qui ne peut concerner que les déchets ultimes. Au-delà de la technique (mécanique, thermique, chimique) de séparation et de récupération d'éléments valorisables, il est important de positionner le déchet composite dans cette hiérarchie et donc, d'un point de vue environnemental, de privilégier le recyclage à la valorisation. Ce prérequis ne conduit hélas pas nécessairement à la solution techniquement la plus pertinente en termes de performance fonctionnelle et de valeur ajoutée du produit traité. Le meilleur choix du procédé de gestion des déchets composites, adapté à un gisement donné, est donc délicat et doit résulter d'un compromis entre efficacité technique, rentabilité économique, bilan énergétique et environnemental.

5. DÉVELOPPEMENT

Avancées technologiques

Il est également possible d'évaluer le degré de maturité des technologies de gestion des déchets avec l'échelle TRL (Technology readiness level). Ce système, mis au point par les équipes de la Nasa en 1991, comporte neuf niveaux servant à estimer le passage d'une technologie à l'étape industrielle. Le niveau de maturité le plus bas correspond à une idée initiale dont les principes de base ont été observés et décrits, tandis que le niveau le plus élevé correspond à un système réel, qualifié par des missions opérationnelles réussies. Le recyclage mécanique, principalement utilisé pour les composites à fibres de verre, a atteint des niveaux de maturité technologique hauts (jusqu'à 9), à l'échelle industrielle et commerciale. Ce procédé peut donc conduire à une option de gestion des composites à fibres de verre viable techniquement et économiquement. Le recyclage mécanique des composites à fibres de carbone est beaucoup moins répandu et la technologie n'est parvenue qu'à un stade de maturité faible (TRL 3), c'est-à-dire que la preuve du concept a été établie mais que la faisabilité de l'industrialisation reste à démontrer. D'un point de vue environnemental, ces procédés oscillent entre recyclage et valorisation. En revanche, la faible valeur de la matière de base et des applications potentielles (composites à fibres coupées, plus ou moins dégradées) est pénalisante sur le plan économique.

Les procédés de solvolyse ont atteint des degrés de maturité technologique différents selon qu'il s'agit de composites à fibres de verre ou à fibres de carbone. Le traitement des composites à fibres de verre reste à l'état



Après plusieurs essais concluants de décomposition enzymatique de polymères, Carbios veut appliquer son procédé aux composites.

de concept démontré (TRL 2 et 3), mais peine à passer ce cap. Les réalisations à l'échelle du laboratoire sont peu nombreuses et les premiers essais industriels sont peu probants. Certains projets de traitement de composites à fibres de carbone ont été validés en laboratoire et leurs prototypes ont démontré leur efficacité en environnement opérationnel (TRL de 4 à 7). Ces procédés couvrent une large gamme en termes de hiérarchie de gestion des déchets et les produits obtenus peuvent, dans certains cas, présenter un fort potentiel de valeur ajoutée.

Les procédés de pyrolyse concernent principalement les composites à fibres de carbone. Les projets sont bien avancés, avec des essais validés en laboratoire et disposant d'un potentiel de transposition industrielle intéressant (TRL de 4 à 5). Par ailleurs, ils sont également bien positionnés en termes de hiérarchie de gestion des déchets. Ils présentent donc un potentiel qu'il convient néanmoins de confirmer. Certains des produits résultants pourraient également offrir une valeur ajoutée élevée. Pour l'heure, même si certaines tendances commencent à s'affirmer, les différentes options de gestion des déchets composites restent à explorer. Leur développement industriel dépendra non seulement de la technologie adoptée, mais aussi de la réglementation et du contexte technico-économique reposant sur l'importance des gisements et des coûts des matières premières et secondaires. ●



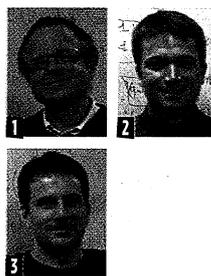
Contrôler le mouvement des fluides

Jean-Michel Coron, Sorbonne Université, Frédéric Marbach, CNRS-Irmar et Franck Sueur, université de Bordeaux

Étudiant les fluides régis par l'équation de Navier-Stokes, nous avons prouvé, en combinant théorie du contrôle et hydrodynamique, qu'il est toujours possible d'amener rapidement ces fluides au repos, en agissant sur une partie du bord. Et ce quelles que soient la forme du domaine et l'intensité du frottement le long des parois.

Un satellite dont on peut modifier l'orientation et la position à l'aide de poussées délivrées par des tuyères; une voiture dont on peut changer la trajectoire en tournant le volant: voilà deux exemples de systèmes de contrôle dont l'évolution peut être influencée à l'aide de commandes (également appelés contrôles). Ces derniers sont décrits par des équations différentielles, c'est-à-dire des équations qui relient une fonction et ses dérivées par rapport au temps. Pour d'autres systèmes, l'état est décrit par une fonction d'une variable spatiale, et l'évolution par une équation aux dérivées partielles. Une telle équation relie une

fonction et ses dérivées par rapport au temps, mais aussi par rapport à toutes les variables spatiales (par exemple x, y, z). C'est le cas du système que nous avons étudié, à savoir celui d'un fluide visqueux incompressible dont l'évolution – les variations en temps et en espace – du champ des vitesses est régie par l'équation établie par le Français Henri Navier et le Britannique George Stokes au XIX^e siècle. L'équation de Navier-Stokes reste aujourd'hui l'une des plus emblématiques dans le domaine des équations aux dérivées partielles. Une question centrale de la théorie du contrôle est de déterminer si l'état du système peut être amené d'un état initial donné à un état final désiré à l'aide de contrôles



MATHÉMATIENS

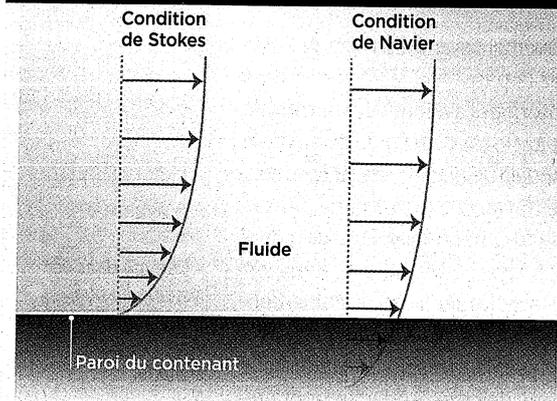
Jean-Michel Coron (1) est professeur à Sorbonne Université. Frédéric Marbach (2) est chargé de recherche CNRS à l'Institut de recherche mathématiques de Rennes. Franck Sueur (3) est professeur à l'université de Bordeaux.

bien choisis. Notre travail commun, qui porte sur l'équation de Navier-Stokes, avec une condition particulière sur les bords, a permis de conclure que c'est bien le cas (1). Autrement dit, un fluide régi par l'équation de Navier-Stokes peut toujours être ramené au repos en agissant sur une partie du bord de ce fluide. Nous répondons ainsi – partiellement – à une question posée à la fin des années 1980 par le mathématicien français Jacques-Louis Lions, pionnier des équations aux dérivées partielles (il a donné son nom à l'un des plus importants laboratoires français à aborder cette thématique, à Sorbonne Université). Ce problème de la contrôlabilité a d'abord été étudié pour les équations différentielles, notamment par le Hongrois Rudolf Kalman: en 1963, il a donné une condition nécessaire et suffisante de contrôlabilité de certains systèmes linéaires (dans un système linéaire, toute combinaison linéaire des solutions des équations est aussi une solution des équations). De

Contexte

Liée à la turbulence, l'équation de Navier-Stokes est l'une des plus emblématiques de la mécanique des fluides. Sa résolution rigoureuse reste un problème difficile; la fondation américaine Clay en a même fait l'un des « problèmes du millénaire », dont la résolution serait récompensée par un prix de 1 million de dollars.

Conditions sur la paroi



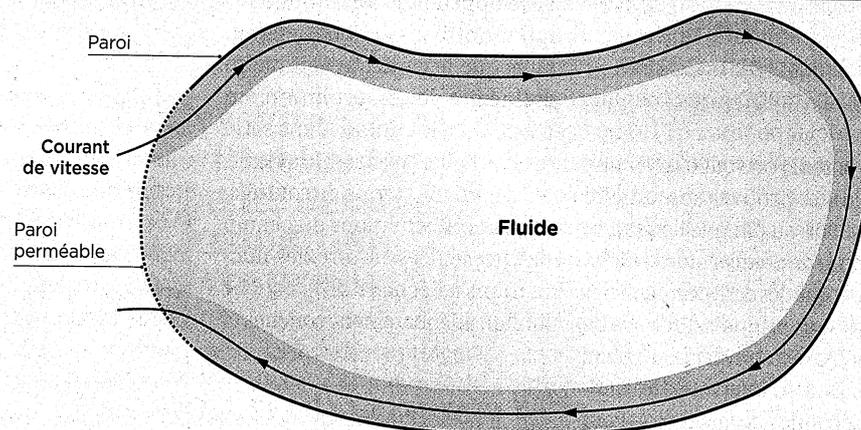
▲ Selon la nature du matériau constituant la paroi d'un contenant, le profil de vitesse tangentielle diffère. Avec la condition de Stokes, le fluide est à l'arrêt au niveau de la paroi et accélère à mesure qu'il s'en éloigne. Avec la condition proposée par Navier, le fluide glisse et la vitesse est non nulle, même au voisinage de la paroi.

(*) La théorie des distributions généralise la notion de fonctions et de dérivées en introduisant des distributions, comme la masse de Dirac, qui vaut l'infini en un point et 0 partout ailleurs et dont l'intégrale vaut 1.

frottement, qui traduit la viscosité interne du fluide et qui sera aussi étudié par Stokes en 1849. C'est ainsi qu'est apparue la fameuse équation de Navier-Stokes (3). Malheureusement, très peu de solutions explicites à cette équation sont connues, contrairement au cas de l'équation d'Euler. Cette difficulté a motivé la recherche

de solutions abstraites qui donneraient, malgré tout, quelques informations prédictives. En 1934, le Français Jean Leray annonce ainsi des résultats révolutionnaires sur l'existence de solutions à l'équation de Navier et Stokes. Ces solutions sont a priori très irrégulières et ne satisfont l'équation qu'en un sens très faible : les dérivées utilisées par Leray sont à comprendre en un sens généralisé, qui anticipe la théorie des distributions (*) qu'établira le Français Laurent Schwartz une quinzaine d'années plus tard. Dans le cas d'une donnée proche du repos (c'est-à-dire pour un fluide dont les particules se déplacent initialement à petite vitesse), Leray prouve la régularité et l'unicité de ces solutions. Dans le cas d'une donnée initiale loin du repos, on ignore encore si la solution reste régulière en temps long. Cette question fait même partie de la liste des six problèmes du millénaire qu'il reste à résoudre, proposée par la fondation Clay (4). Heureusement, il est parfois ●●●

Un tapis roulant virtuel



▲ Pour faire revenir au repos un fluide contenu dans un domaine, on instaure, en laissant entrer et sortir du fluide, un champ de vitesse transitoire - une sorte de tapis roulant virtuel, à l'intérieur du domaine - comme dans un restaurant de sushis à comptoir tournant. La portion de la paroi contrôlée (en pointillé) sert à la fois à souffler dans la partie haute et à aspirer dans la partie basse pour mettre en place ce courant de vitesse. La zone grisée au voisinage de la paroi correspond à une zone de remous (la couche limite).

manière étonnante, il montre que cette condition ne dépend pas de l'intervalle de temps imparti, mais uniquement du système considéré : si l'on peut contrôler un système linéaire de dimension finie en un an, on peut aussi le contrôler en une seconde (2).

Que faire lorsqu'on veut comprendre des systèmes non linéaires ? On peut tenter de simplifier en linéarisant autour d'un point d'équilibre, de la même façon qu'une tangente éclaire le comportement d'une courbe au voisinage d'un point. Cette méthode fonctionne bien lorsque l'état initial donné et l'état final désiré sont assez proches. Elle est de fait très utilisée, tant en mathématiques que dans l'industrie. Mais elle ne donne rien pour les systèmes non linéaires quand les deux états ne sont pas très proches. Il est alors nécessaire de regarder au cas par cas. Par ailleurs, alors qu'il existe quantité de théorèmes sur les équations différentielles ordinaires qui garantissent l'existence d'une solution, il n'y a rien de tel pour les équations aux dérivées partielles, bien plus complexes à aborder. Là réside un enjeu supplémentaire pour les systèmes de contrôle modélisés par des équations aux dérivées partielles.

Viscosité linéaire

Historiquement, l'une des premières équations de ce type est celle établie par Leonhard Euler en 1757. Cette équation dite d'Euler décrit l'évolution de la vitesse d'un fluide incompressible en chaque point du domaine occupé par le fluide - l'inconnue de l'équation est la vitesse qui dépend aussi du temps. Toutefois, cette équation implique que si un corps se meut dans un tel fluide, il ne rencontre aucune résistance, ce qui est contraire à la réalité physique. Navier résout ce paradoxe en 1822, en ajoutant un terme de



••• plus facile de contrôler que de prédire, pour reprendre une phrase attribuée au mathématicien John von Neumann (1903-1957). Le résultat que nous avons obtenu va dans ce sens, puisque nous avons démontré que, quelles que soient la donnée initiale et la durée impartie, il existe une manière d'exercer un contrôle afin d'amener le fluide à un état final prescrit (par exemple au repos, où la vitesse est partout nulle). Notre résultat concerne un fluide dans un contenant, et les contrôles sont exercés sur une partie des parois où on laisse entrer et sortir du fluide, alors que le reste de la paroi est supposé imperméable. L'imperméabilité impose que la composante normale de la vitesse du fluide (orthogonale à la paroi) soit nulle sur la paroi. Pour l'équation d'Euler, cette condition suffit à déterminer complètement le système (avec cette seule condition, on montre qu'il y a une solution et qu'elle est unique). En revanche, cela n'est pas suffisant pour l'équation de Navier-Stokes : la prescription d'une deuxième condition est

Le courant emmène de quoi compenser en moyenne les remous créés au bord

nécessaire si l'on veut trouver une solution et prouver son unicité (cela est dû au fait que l'équation d'Euler est du premier ordre – elle ne contient que des dérivées premières de la vitesse –, tandis que celle de Navier-Stokes est du deuxième ordre – elle fait aussi intervenir des dérivées secondes de la vitesse). Pour cette deuxième condition, alors que Stokes propose une condition d'annulation de la vitesse sur la paroi, c'est-à-dire à la fois des composantes normales et tangentielles de la vitesse, Navier propose des lois de

glissement avec frottement du fluide sur la paroi (Fig. 1). Des résultats antérieurs avaient déjà permis de traiter le cas d'un fluide décrit par le modèle d'Euler (il s'agit notamment de travaux de Jean-Michel Coron, puis d'Olivier Glass). Pour ces équations, les tourbillons sont transportés avec les particules du fluide. L'observation cruciale est que l'on peut agir sur la pression du fluide sur le bord, de façon à créer temporairement un courant qui explore tout le domaine où se trouve le fluide et vidange les tourbillons. Autrement dit, avec cette manœuvre de contrôle, en agissant sur la pression, on peut amener le fluide au repos. Pour y parvenir dans le temps imparti, il est nécessaire d'imposer au fluide, temporairement, de grandes vitesses.

Des microfluctuations

Pour l'équation de Navier-Stokes, cette stratégie se heurte à une complication, car il se crée des remous au voisinage du bord : c'est le phénomène de couches limites. Toutefois, en partant d'un travail précédent de Dragos Iftimie et Franck Sueur, nous sommes parvenus à décrire ces dernières à l'aide d'un développement asymptotique (*) qui montre les échelles en jeu, ainsi que le caractère laminaire et linéaire de son évolution. En particulier, le courant dans cette couche limite permet de transporter, à partir de la zone de contrôle, des microfluctuations du champ de vitesse (c'est-à-dire des fluctuations à l'échelle de la couche limite), adéquatement conçues et



▲ Comme dans ce système de nuages, les tourbillons sont transportés par le fluide.

(*) Un développement asymptotique d'une fonction, au voisinage d'un point par exemple, est une somme finie de fonctions de référence qui fournit une bonne approximation du comportement de la fonction au voisinage du point considéré.

programmées de façon à ce que, tout le long de la partie imperméable de la paroi, les microfluctuations résultantes au moment de l'extinction du courant aient une moyenne nulle. Alors, nous montrons qu'une fois le courant éteint – quand la manœuvre de contrôle est terminée –, ces couches limites se dissipent de manière accélérée et le fluide revient ainsi très près du repos. Ce phénomène d'accélération est bien connu pour l'équation de la chaleur.

L'idée de programmer la dissipation de la couche limite avait déjà été exploitée par Frédéric Marbach pour contrôler une autre équation aux dérivées partielles, l'équation de Burgers. Une métaphore illustre cette stratégie : de la même manière que, dans ces restaurants de sushis où les plats sont servis sur un tapis roulant, le contrôle est ici envoyé à partir d'une zone localisée du bord (la zone perméable, contrôlée), de manière que le courant emmène de quoi compenser en moyenne les remous créés au bord (Fig. 2). Une fois que le fluide est très proche du repos, on peut l'amener exactement au repos en étudiant le système linéarisé en zéro, d'où l'intérêt d'avoir étudié préalablement le contrôle d'équations linéaires. C'est ainsi que nous avons pu démontrer que l'on peut contrôler l'équation de Navier-Stokes.

Reste que cette stratégie ne permet pas de traiter le cas des conditions au bord considérées par Stokes. Pour ces dernières, le comportement de la couche limite est plus mauvais et il apparaît une turbulence que l'on ne parvient pas à contrôler. Une méthode complètement nouvelle reste à imaginer... ■



L'ÉQUIPE LAURÉATE EN MATHÉMATIQUES

■ Jean-Michel Coron, Frédéric Marbach et Franck Sueur ont reçu le prix La Recherche pour leur article : « Small-time global exact controllability of the Navier-Stokes equation with Navier slip with friction boundary conditions », *J. Eur. Math. Soc.*, sous presse, arXiv:1612.08087, 2018.

- (1) J.-M. Coron *et al.*, *J. Eur. Math. Soc.* (sous presse), arXiv:1612.08087, 2018.
- (2) R. E. Kalman, *JSIAM Control*, 1, 152, 1963.
- (3) C.-L. Navier, *Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France*, 6, 389, 1823.
- (4) www.claymath.org

La déchéance de Pluton

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

Découverte en 1930 par l'observatoire Lowell, aux États-Unis, Pluton est d'abord devenue la neuvième planète du Système solaire. Mais, les critères d'obtention de ce statut ayant été redéfinis, l'Union astronomique internationale a fini par la déclasser en 2006. Une décision remise en question par certains astronomes aujourd'hui.



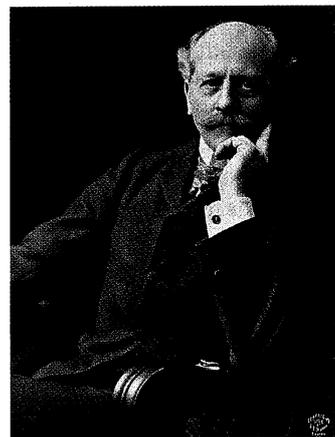
AGRÉGÉE DE PHYSIQUE

À travers ses livres, cette normalienne passionnée de vulgarisation scientifique cherche à faire connaître les sciences par l'approche historique ou l'anecdote.

Après que les calculs de John Couch Adams et Urbain Le Verrier eurent permis la découverte de la planète Neptune, en 1846, par analyse des anomalies de la trajectoire d'Uranus, les astronomes pensaient avoir définitivement résolu le problème des fantaisies orbitales de cette dernière. Mais une fois la trajectoire de Neptune mieux connue, force fut de constater que la présence de celle-ci n'expliquait pas tout. De fil en aiguille, les astronomes de la fin du XIX^e siècle en étaient venus à postuler l'existence d'une planète supplémentaire, encore plus lointaine. Deux Américains ouvrent la voie dans la traque de ce nouvel astre supposé. Percival Lowell, héritier d'une riche famille de Boston,

s'était consacré à l'astronomie après avoir lu le rapport de l'Italien Giovanni Schiaparelli sur les canaux martiens, ces illusions d'optique qui avaient laissé croire à des signes de vie sur la planète Rouge. À ses frais, il avait fait construire un observatoire près de Flagstaff, en Arizona, pour observer les planètes. Lowell avait trouvé un allié de choix en la personne de l'astronome William Henry Pickering. L'idée de débusquer une planète transneptunienne était devenue une obsession pour les deux hommes.

La quête de cet objet, que Lowell appelle planète X en raison de son caractère inconnu, débute en 1905. L'orbite de Neptune n'étant pas encore parfaitement connue, la recherche est axée sur l'observation et l'analyse des anomalies de l'orbite d'Uranus. Elle se révèle rapidement plus longue et plus ardue que prévu. Certes, les plaques photographiques ont remplacé l'œil humain au foyer des télescopes, permettant des expositions prolongées. Mais la probabilité de déceler le mouvement fugace d'un point de faible intensité lumineuse par rapport à des dizaines, voire des centaines de milliers d'étoiles, reste infime.



▲ L'Américain Percival Lowell (1855-1916) s'est consacré à la recherche d'une planète transneptunienne.

Lowell commence par comparer, en les superposant, les photographies d'une même partie du ciel, prises à quelques jours d'intervalle, avant de se rendre compte de l'inefficacité de la méthode. L'acquisition, en 1911, d'un comparateur à clignotement va rendre la tâche moins fastidieuse, en faisant voir à tour de rôle et très rapidement deux photographies successives. Alors que les étoiles ne bougent pas quand une image remplace l'autre, un corps en mouvement dans le Système solaire – une planète – saute alternativement

Contexte

Liée à l'essor de la photographie astronomique, la découverte de Pluton, en 1930, marque la revanche de l'observation sur le calcul. Dans les décennies qui suivront, l'étude systématique de Pluton ira de pair avec celle des confins du Système solaire, et conduira les astronomes à reconsidérer et clarifier les concepts en vigueur, parfois au prix de querelles douloureuses.

d'une position à une autre: il clignote. Pourtant, même ainsi, la recherche est infructueuse. Pendant cinq ans, l'équipe de l'observatoire a beau photographier systématiquement le ciel, analyser les perturbations des orbites des planètes géantes, prendre et reprendre ses calculs, dépouiller et comparer une infinie succession d'images, rien n'y fait. En 1915, dans une ultime publication, *Memoir on a Trans-Neptunian Planet*, Lowell annonce que la planète X aurait une masse environ sept fois supérieure à celle de la Terre. L'année suivante, il meurt d'une crise cardiaque, ce qui met un coup d'arrêt temporaire aux recherches.

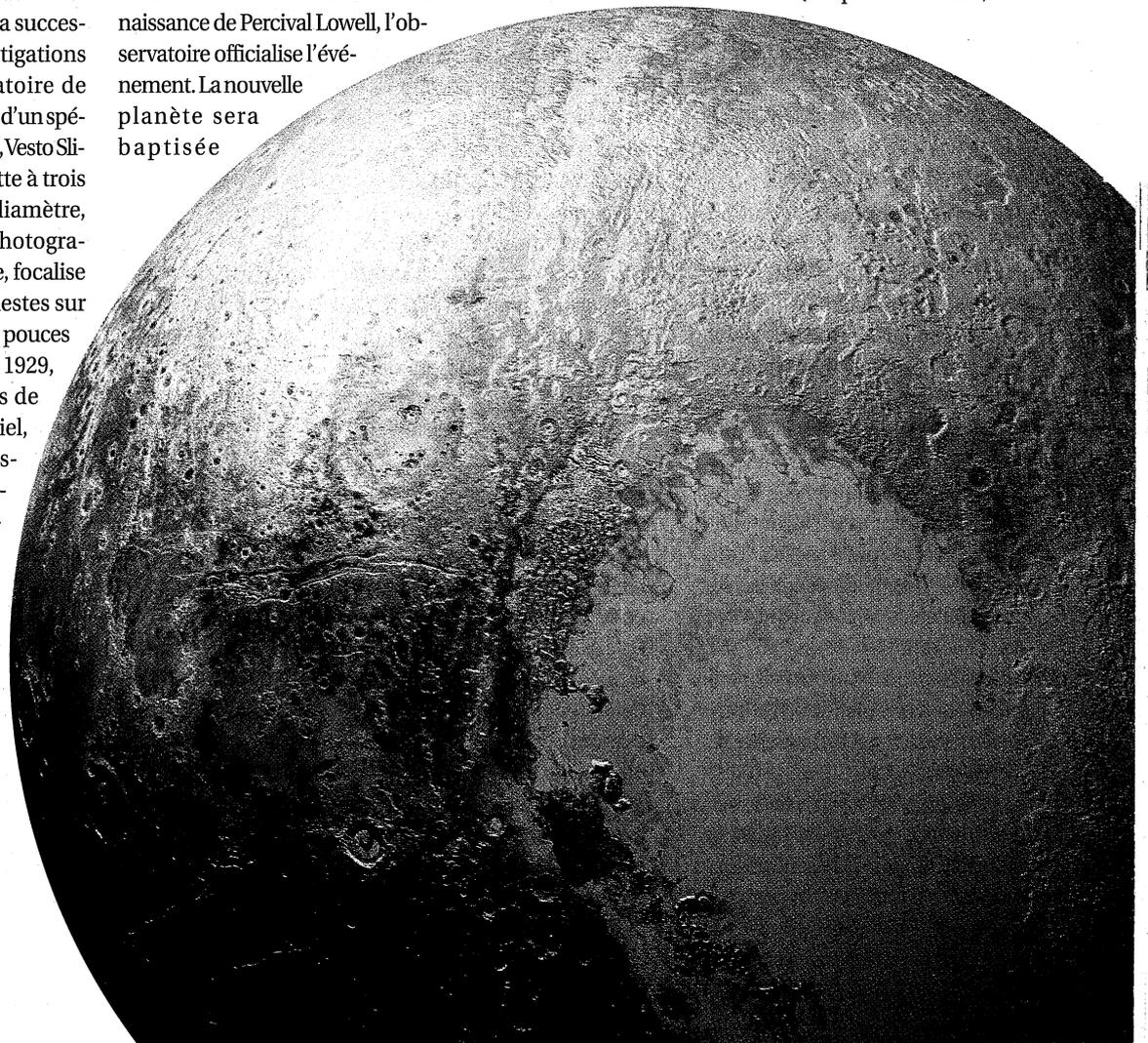
La planète X repérée

Après plusieurs années d'interruption liées aux tracasseries administratives engendrées par la succession de Lowell, les investigations reprennent à l'observatoire de Flagstaff, sous la direction d'un spécialiste de la spectroscopie, Vesto Slipher. Une nouvelle lunette à trois lentilles de 32,5 cm de diamètre, dotée d'une chambre photographique ultraperformante, focalise la lumière des objets célestes sur des plaques de verre de 14 pouces sur 17 (36 cm sur 43). En 1929, à la suite d'un concours de circonstances providentiel, Slipher embauche l'assistant rêvé: Clyde W. Tombaugh, un robuste garçon de ferme du Kansas, passionné d'astronomie et capable de passer ses nuits à observer les astres, été comme hiver, dans un dôme ouvert à plus de 2000 m d'altitude. Tombaugh comprend rapidement que les

chances de repérer la planète X sont plus élevées lorsque la Terre se trouve entre la zone à photographier et le Soleil. Durant ces périodes, un objet peu distinct paraît plus violemment éclairé et fait apparaître un mouvement plus prononcé. Par ailleurs, la gêne due aux mouvements parasites des astéroïdes diminue: plus proches aussi et plus rapides que la planète X, ils laissent alors de longues traînées facilement identifiables sur des clichés. Cette nouvelle démarche va porter ses fruits. Le 18 février 1930, Tombaugh compare deux photographies prises un mois auparavant, les 23 et 30 janvier, quand la constellation des Gémeaux se trouvait en opposition avec le Soleil. Un point lumineux a bougé. De 3,5 mm à peine, mais il a bougé. Le 13 mars 1930, jour anniversaire de la découverte d'Uranus et de la naissance de Percival Lowell, l'observatoire officialise l'événement. La nouvelle planète sera baptisée

Pluton, en référence au dieu des Enfers dans la mythologie romaine, frère de Jupiter et de Neptune, avec un clin d'œil à Percival Lowell, dont les initiales forment les deux premières lettres (lire l'encadré p. 74). Ironie du sort, en mars et en avril 1915, l'observatoire Lowell avait capturé deux images de Pluton, qui étaient passées inaperçues en raison d'une brillance bien inférieure aux prévisions.

Dans les années qui suivent, il se révèle rapidement que Pluton ne répond pas aux attentes et que sa découverte doit plus à la recherche systématique qu'à l'exactitude des calculs effectués. Même avec les instruments les plus puissants de l'époque, Pluton n'apparaît que sous la forme d'une tache floue. Ou bien la planète est très sombre (ce que démentira, ●●●



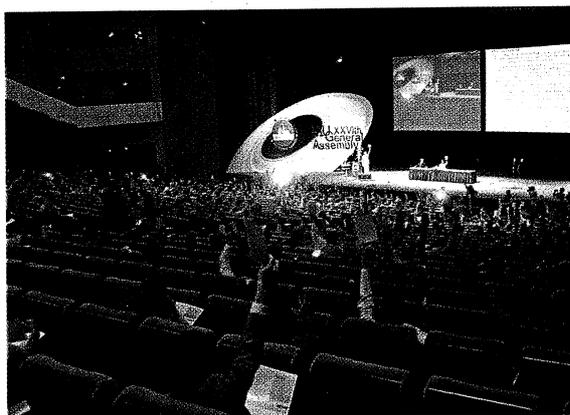
► D'un rayon de 1188 km, Pluton est la planète naine la plus volumineuse connue dans le Système solaire.

••• en 1976, l'étude spectroscopique en mettant en évidence de la glace de méthane fortement réfléchissante) ou alors elle est bien plus petite que prévu, plus petite même que Mercure. Dans ce cas, il aurait fallu que Pluton ait une densité phénoménale pour perturber la trajectoire de planètes aussi massives et éloignées qu'Uranus et Neptune. Pluton est-elle vraiment la planète recherchée ? D'ailleurs Pluton est-elle réellement une planète ? Son orbite ne ressemble pas à celle de ses consœurs. Inclivée de plus de 17° par rapport au plan dans lequel se déplace le Soleil, elle est aussi fortement excentrée, à tel point qu'elle croise l'orbite de Neptune. Pluton ne serait-il pas, comme l'avait suggéré le mathé-

Depuis 1992, la mise en évidence de nombreux petits corps gelés du même type s'accélère

maticien britannique Raymond Lyttleton en 1936 et, à sa suite, l'astronome néerlandais Gerard Kuiper en 1950, un ancien satellite de Neptune qu'une perturbation gravitationnelle aurait éjecté et placé en orbite autour du Soleil ?

Cette hypothèse devient caduque en 1978, lorsque James W. Christy, de l'Observatoire naval des États-Unis, découvre que Pluton elle-même possède une lune, Charon, d'abord pris pour une excroissance de la planète. Un satellite qui, avec une taille représentant la moitié de celle de Pluton et une masse seulement huit fois plus faible, affecte fortement sa trajectoire (à titre de comparaison, la Lune est presque 100 fois plus légère que la Terre). Le centre de gravité du système se situe dans le vide, en dehors de Pluton. Du jamais-vu dans le monde des planètes !



▲ Une résolution de l'Union astronomique internationale, votée en août 2006, a relégué Pluton au rang de planète naine.

Pis encore. Dans les décennies qui suivent, les télescopes révèlent que Pluton n'est rien d'autre que le premier d'une population de petits corps gelés, croisant au-delà de l'orbite de Neptune, à la périphérie du Système solaire, dans la zone baptisée ceinture de Kuiper. Après la découverte en 1992 d'un premier objet de 120 km de diamètre moyen, la mise en évidence de nombreux autres objets du même type se poursuit à un rythme accéléré, avec pour certains d'entre eux des masses comparables à celle de Pluton : Quaoar en 2002, Sedna en 2003 et surtout, deux ans plus tard, UB313, appelé par la suite (non sans humour) Éris, du nom de la

déesse grecque de la discorde. Éris apparaît légèrement plus gros que Pluton et plus massif. La découverte, par Michael E. Brown et son équipe de l'Institut de technologie de Californie, de cette dixième planète en puissance est la goutte d'eau qui fait déborder le vase. Le moment ne serait-il pas venu de ranger Pluton et ses voisins dans une catégorie à part, comme jadis Cérés, Pallas, Junon et Vesta avaient été déclassées de planètes à astéroïdes après la découverte d'autres corps similaires ?

Nettoyage d'orbite

En août 2006, fermement décidée à régler le problème, l'Union astronomique internationale (UAI) met la question à l'ordre du jour lors de son congrès de Prague et propose de redéfinir la notion de planète. Après des débats houleux et par crainte de se retrouver avec des centaines de planètes à la fin du siècle – situation qu'elle estime ingérable –, elle invite les participants à se prononcer sur la résolution suivante. Pour prétendre au titre de planète, un objet céleste doit satisfaire à trois critères : être en orbite autour du Soleil, présenter une forme sphérique, et être dominant d'un point de vue gravitationnel, c'est-à-dire avoir écarté

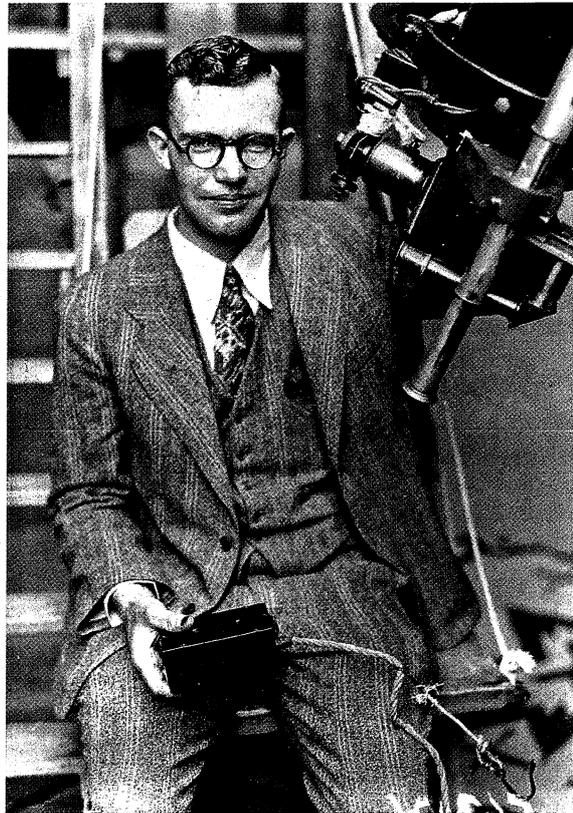
UN NOM À SUCCÈS

Le 14 mars 1930, Falconer Madan, bibliothécaire émérite de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, lit à sa petite-fille de 11 ans, Venetia Burney, l'histoire de la découverte d'une nouvelle planète à l'observatoire Lowell de Flagstaff, en Arizona. Pour l'écolière, férue de mythologie, un astre aussi sombre et lointain ne peut qu'être appelé Pluton, en référence au dieu des Enfers, frère de Jupiter et de Neptune, dans la mythologie romaine. Madan fait part de cette proposition à son ami l'astronome Herbert Turner, qui télégraphie à l'observatoire Lowell. Celui-ci accueille la suggestion avec bienveillance, d'autant que les deux premières lettres du nom correspondent aux initiales de son fondateur, Percival Lowell, qui avait traqué la planète de nombreuses années durant. Le 1^{er} mai 1930, le directeur de l'observatoire, Vesto Slipher, annonce que, parmi les centaines de noms proposés, le choix s'est porté sur Pluton. Et il attribue officiellement la paternité de la suggestion à Venetia Burney. Hasard ou coïncidence, la même année, le dessinateur Walt Disney nommera Pluto (l'équivalent de Pluton en anglais) le fidèle compagnon de son héros fétiche, Mickey.

de son orbite les corps rivaux en les piégeant en tant que satellites ou en les repoussant au loin. Autrement dit, avoir « nettoyé » son orbite. C'est sur cette dernière condition que le bât blesse. Pluton a une masse et une gravité suffisantes pour être sphérique, mais insuffisantes pour faire le ménage sur son orbite, qu'elle partage avec d'autres corps. La résolution recueille 237 suffrages contre 157. Conclusion: le 24 août, Pluton est reléguée au rang de planète naine, nouvelle catégorie d'objets célestes créée pour la circonstance. Éris rejoint Pluton dans ce groupe, de même que l'astéroïde Cérés, qui se voit promu en même temps que Pluton est déclassée. Hauméa et Makémaké se joindront officiellement à eux en 2008, tandis que les astéroïdes non sphériques et les comètes forment la caste des petits corps du Système solaire.

Le vote de l'UAI est diversement apprécié. Preuve du dynamisme d'une science en perpétuelle évolution pour certains – dont Mike Brown, devenu « l'homme qui a tué Pluton » –, hérésie scientifique pour d'autres. Au premier rang des avocats de Pluton, Alan Stern, responsable de la mission New Horizons, lancée par la Nasa en janvier 2006 à destination de Pluton et de la ceinture de Kuiper – avec, à son bord, une partie des cendres de Tombaugh. Alan Stern considère le critère du nettoyage d'orbite comme imprécis. La Terre, Mars, Jupiter, Neptune, toutes ces planètes dérogent à cette règle en partageant leur trajectoire avec des astéroïdes. En outre, il juge la décision de l'UAI non représentative de la communauté astronomique. Moins d'un quart des présents à l'assemblée générale de l'UAI ont pris part au vote.

Avec d'autres artisans de la mission New Horizons, Alan Stern revient à la charge en 2017. Les données recueillies après le passage de la sonde New Horizons à proximité



▲ Des cendres de Clyde W. Tombaugh ont été transportées à bord de la mission New Horizons, lancée en 2006 vers Pluton.

de Pluton, le 14 juillet 2015, ont permis à l'équipe de la Nasa de déterminer avec précision le rayon de l'ancienne planète, jusque-là sujet à débat. Avec un rayon de 1 185 km (à 10 km près) contre 1 163 km (à 6 km près) pour Éris, Pluton est plus grande que prévu et coiffe sa rivale au poteau.

Le 21 mars 2017, lors de la 48^e Conférence des sciences lunaires et planétaires, près de Houston, au Texas, le planétologue Kirby Runyon, qui avait analysé les données géologiques de Pluton, enfonce le clou en faisant valoir la richesse de cette dernière. Dès lors qu'elle possède une taille suffisante pour être sphérique sous l'effet de la gravité, elle mérite d'être réhabilitée, cette propriété allant de pair avec le déclenchement de processus géologiques de réorganisation interne. En mai 2018, Alan Stern et l'astrobiologiste David Grinspoon lancent une nouvelle offensive dans un article du *Washington Post*. Parmi les arguments susceptibles d'inciter l'UAI à revoir

sa copie, l'existence d'exoplanètes. La définition de l'UAI ne s'applique qu'au Système solaire. Or des milliers d'autres planètes ont été découvertes autour d'étoiles de notre Galaxie. Et, si le statut de planète dépend de la capacité à expulser les objets qui orbitent à proximité, la Terre n'aurait pu être ainsi qualifiée au cours des premières 500 millions d'années de son existence.

Définition géophysique

Le 29 août 2018, Alan Stern et Kirby Runyon récidivent dans le journal *Icarus*, en appuyant une étude de l'université de Floride centrale, dirigée par le planétologue Philip Metzger, qui fait état de considérations historiques. Dans la littérature scientifique des deux siècles derniers, le critère de nettoyage d'orbite n'est apparu qu'une seule fois, sous la plume de William Herschel, en 1802, juste après la découverte de Cérés, et sur la base d'un raisonnement fallacieux. Et Philip Metzger d'ajouter que peu d'astronomes utilisent les critères de l'UAI dans la pratique. Avec ses collègues, il propose une définition géophysique des planètes, fondée sur les propriétés intrinsèques des corps et non leurs propriétés orbitales, susceptibles de varier au fil du temps. Mérite le titre de planète tout corps sphérique dont la masse est néanmoins insuffisante pour déclencher les réactions de fusion nucléaire propres aux étoiles. Une définition qui, si elle était adoptée, serait lourde de conséquences. « *Autant appeler une île un continent* », ironise Mike Brown. Le bestiaire des planètes naines ne cessant de s'enrichir, des dizaines, voire des centaines, d'objets transneptuniens se verraient promus, ainsi que les plus gros des satellites des planètes actuelles! Y compris notre Lune qui, planète dans l'Antiquité, le redeviendrait après une éclipse de plusieurs millénaires. Affaire à suivre... ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- P.T. Metzger et al., « The Reclassification of Asteroids from Planets to Non-Planets », *Icarus*, 319, 21, 2019.
- tinyurl.com/Yes-Pluto-Planet
- David Grinspoon et Alan Stern, « Yes, Pluto is a Planet », *The Washington Post*, 7 mai 2018.
- K.D. Runyon et al., « A Geophysical Planet Definition », 48^e Conférence des sciences lunaires et planétaires, 2017.
- Mike Brown, *How I Killed Pluto and Why It Had It Coming*, Spiegel & Grau, 2012.

La bioénergie pire que le charbon ?

En 2015, nous avons expliqué, sur la base d'études scientifiques, en particulier les travaux de B. Holtzmark, comment la combustion de la biomasse et particulièrement du bois n'était pas neutre en carbone. L'explication est à la portée d'un élève de lycée. Depuis, chaque fois que nous en parlons à des personnes dont le niveau d'éducation est bien au-delà du secondaire, on nous répète la sempiternelle comptine : « je coupe un arbre, je brûle un arbre, il émet son carbone, je plante un arbre, il absorbe la même quantité de carbone. » Le magicien ajouterait « et Hop là ». Sauf qu'avec ce raisonnement primaire, on oublie la flèche du temps. par Paul Cantor

Une nouvelle étude, qui vient d'être publiée par des chercheurs du MIT, de Climate interactive et de l'Université Lowell du Massachusetts vient confirmer qu'en 2018, comme en 2015, le bois-énergie n'est pas neutre en carbone – et il ne le sera jamais selon les lois physiques qui gouvernent encore la nature. Les travaux publiés en 2018 sont plus complets sur les éléments du cycle du carbone modélisé que ceux que nous présentions en 2015, mais ils ne tiennent compte, sauf dans les remarques finales, que d'une impulsion d'émission de dioxyde de carbone. Dans ce cas, ils confirment les résultats obtenus par B. Holtzmark et on trouve des cas où la dette carbone du bois-énergie est remboursée en quelques dizaines d'années. C'est de toute façon beaucoup trop long face à l'urgence d'agir vers le zéro carbone. Mais B. Holtzmark était allé plus loin, en étudiant en détail ce qui se passe dans le cadre d'une véritable industrie du bois-énergie, qui correspond à la réalité. Dans ce cas, chaque année, on coupe une certaine quantité d'arbres qui par combustion émettent leur carbone dans l'atmosphère. Du fait du décalage entre la fréquence des coupes et le temps que mettent les nouveaux arbres à repousser (si tout le bois brûlé est replanté, si les arbres replantés absorbent autant de carbone que ceux d'une forêt naturelle, s'il n'a pas de feux de forêt, etc.), on montre quantitativement que la dette carbone, en réalité, n'est jamais remboursée. L'étude de

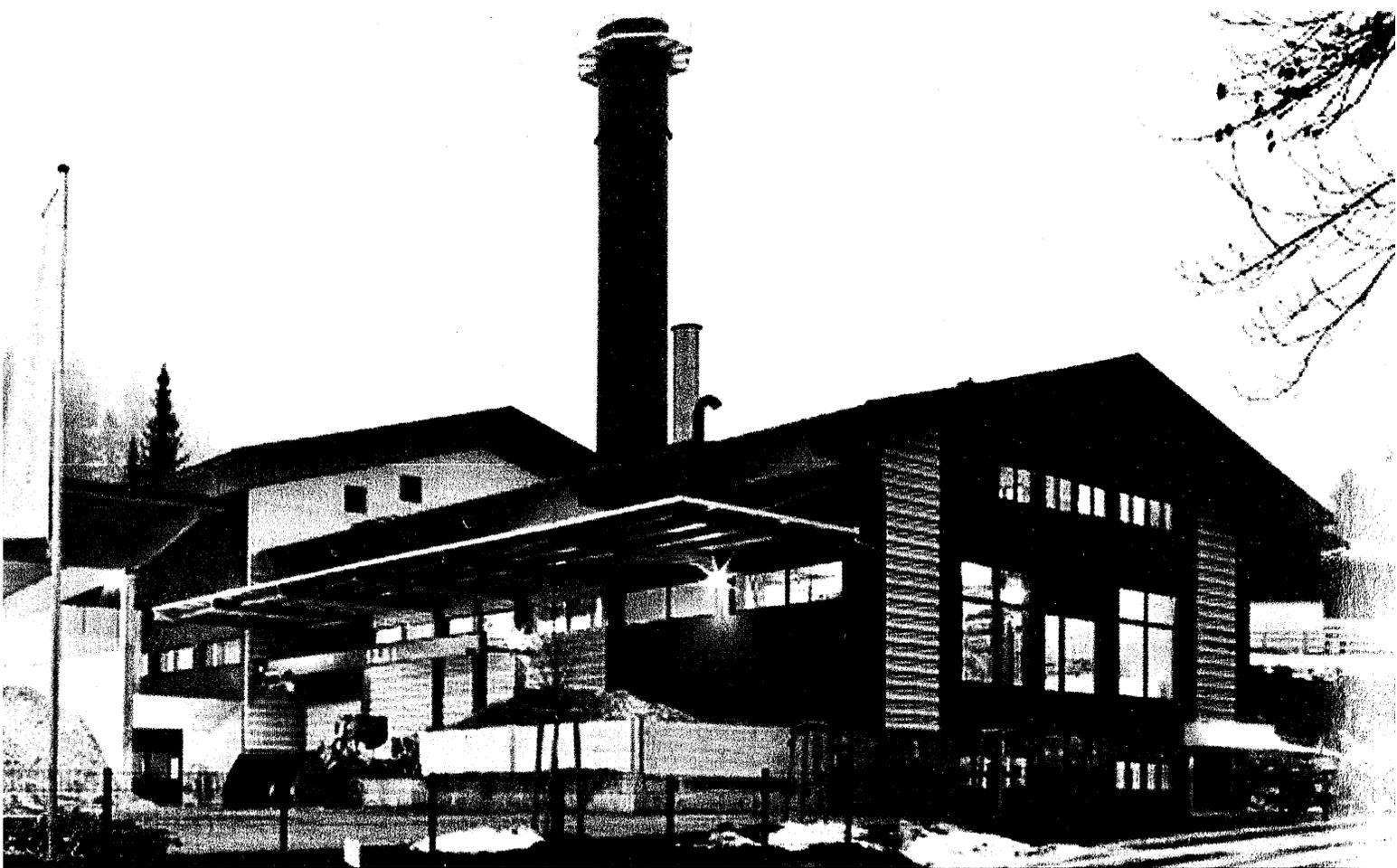
2018 arrive au même résultat, mais sur un plan qualitatif.

Cette illusion de la neutralité carbone est lourde de conséquences sur le climat, puisque les gouvernements dans le monde utilisent la combustion de la biomasse comme moyen de diminuer les émissions et en tiennent dans les bilans d'émissions, qui en sont ainsi considérablement faussés. Avec la poursuite de l'utilisation d'énergies fossiles un peu moins émettrices que le charbon, ce genre de calcul explique en partie comment il se fait qu'après des décennies de supposées réductions relatives d'émissions, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmente de plus en plus vite.

L'Union européenne comptabilise ainsi les biocombustibles dans les énergies renouvelables pour atteindre 20 % d'énergie renouvelable en 2020, ce qui se traduit par une utilisation croissante du bois pour produire de l'électricité et de la chaleur.



Le Royaume-Uni, malgré des mises en garde de scientifiques britanniques, subventionne les plaquettes de bois importées pour la production d'électricité. Le gouvernement fédéral américain et plusieurs états américains envisagent de déclarer la neutralité carbone du bois et de promouvoir son usage. Dans ce cas, le souhait du président Trump de donner la priorité au charbon constituera peut-être un moindre mal, car en plus de ne pas être neutre, à production d'énergie égale, le bois émet plus de dioxyde de carbone que le charbon dans les centrales électriques.



À la COP 23 la Chine et 18 nations ont déclaré leur intention d'accroître la combustion du bois pour produire de l'énergie, dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Cet aveuglement est inquiétant, non seulement pour le climat, mais parce qu'il conduit à se demander si des erreurs analogues ne sont pas aussi répandues dans d'autres domaines d'activité.

ANALYSE EN CYCLE DE VIE ET ANALYSE DYNAMIQUE

Vu de l'atmosphère, une molécule de dioxyde de carbone produit le même effet, qu'elle provienne de la combustion de la biomasse, du charbon, du gaz ou du fioul. D'un autre côté, si on remplace la combustion d'un produit carboné par des énergies de sources décarbonées comme l'éolien ou le solaire (comparées sur le cycle de vie), l'atmosphère voit arriver moins de dioxyde de carbone. Dire que la biomasse est neutre en CO_2 , c'est dire qu'elle aurait le même effet sur l'atmosphère que l'éolien ou le solaire. Pour cela, pour que la biomasse réduise la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, il faut

que la production primaire nette (le carbone qui n'est pas émis du fait de la croissance des plantes) soit supérieure à ce qu'elle aurait été sans exploitation de la biomasse pour la bioénergie. Mais, toujours au moment de la combustion (et en tenant compte de toutes les étapes qui la précèdent), se pose une deuxième question : si on remplace le charbon par de la biomasse, est-ce que cela résulte en plus ou en moins d'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ?

● L'analyse en cycle de vie

Pour répondre à ces deux questions qui portent sur la combustion et les étapes qui la précèdent, on utilise l'analyse en cycle de vie. D'abord, la combustion du bois émet plus de dioxyde de carbone que l'utilisation d'éolien ou de solaire (sur le cycle de vie). Par rapport aux énergies de sources décarbonées, la bioénergie crée déjà une dette carbone au moment de la combustion. Mais en plus, bien que le bois ait approximativement la même intensité en carbone que le charbon (0,027 vs. 0,025 tC.GJ) d'énergie primaire, l'efficacité de la combustion du bois et des granulés ou des plaquettes de

bois est moins élevée. Les estimations suggèrent également des pertes de traitement plus élevées dans la chaîne d'approvisionnement du bois par rapport au charbon.

En conséquence, les centrales électriques à bois génèrent plus de dioxyde de carbone par kWh produit que les centrales au charbon. Brûler du bois plutôt que du charbon crée donc une dette carbone — une augmentation immédiate du dioxyde de carbone atmosphérique par rapport à l'énergie fossile — qui vient s'ajouter à la dette carbone par rapport au remplacement de la combustion du charbon par des énergies de sources décarbonées (ou de la combustion du charbon avec captage de dioxyde de carbone).

La dette carbone totale n'est remboursée qu'après le temps nécessaire pour que la production primaire nette (le carbone absorbé par la croissance de la biomasse) devienne supérieure aux flux de carbone de la biomasse et des sols vers l'atmosphère.

Se pose donc une troisième question : quelles sont les dynamiques de la (re) croissance de la biomasse et comment la production primaire nette et les flux de carbone de la biomasse et des sols vers l'atmosphère dépendent-ils du devenir des terres exploitées pour la bioénergie ?

● L'analyse dynamique

Une analyse dynamique est requise pour répondre à la troisième question. Le cycle du carbone et les impacts climatiques de la bioénergie impliquent des stocks multiples de carbone (par exemple dans la biomasse, les sols et les matières organiques mortes et l'atmosphère) et les processus qui contrôlent le flux de carbone parmi ces stocks, y compris la décomposition de la matière organique, la consommation et la respiration du carbone dans la biomasse et les sols, etc.

Des outils sont nécessaires pour évaluer l'impact climatique dynamique de la bioénergie sur les horizons temporels pertinents pour les politiques climatiques. Le modèle utilisé dans cette étude entre dans ce cadre. Il conclut que dans le cas de coupes uniques dans une même forêt, on obtient des durées entre la décennie et plus d'un siècle pour rembourser la dette carbone. Dans le cas d'une exploitation bien gérée d'une forêt pour la bioénergie, on trouve que dans la plupart des cas, la dette carbone n'est jamais remboursée. Dans le contexte d'une urgence climatique à l'horizon 2050 au plus tard, le bois-énergie est pire que le charbon pour le climat.



● Un modèle détaillé du cycle du carbone

Le carbone dans la biomasse, les sols et les structures (par exemple le bois d'œuvre dans les bâtiments) et les flux parmi ces éléments sont désagrégés par type de terrain, u et région, r . Le carbone peut s'écouler de la biomasse et des sols de chaque parcelle u, r , vers l'atmosphère, sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane. De plus, la récolte et la combustion des bioénergies génèrent des flux de dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone et le méthane associé à des changements dans l'utilisation des terres (comme la transformation de forêts en pâturages, en terres cultivées ou aux terres aménagées) sont prises en compte dans le modèle ne sont pas indiquées sur la figure. Conformément aux approches du GIEC, de la FAO et du US Forest Service, la biomasse en forêt inclut les arbres vivants, y compris les tiges, les branches, le feuillage et les racines externes et les arbres de sous-étage ; le stock dénommé « carbone du sol » comprend la matière organique du sol, les racines mortes, la litière (feuillage mort, branches mortes, etc.), les arbres abattus et morts sur pied et les racines vivantes. La biomasse est accrue par la production primaire nette, qui correspond à la croissance des arbres. Sur l'échelle de temps pertinente pour la politique climat (par exemple jusqu'en 2100), la création de nouveaux combustibles fossiles à partir de sources de carbone terrestres ou océaniques est supposée être négligeable. Les flux de méthane provenant de la biomasse et des sols sont mis à zéro pour les scénarios forestiers considérés

ici pour isoler l'impact de la bio-énergie dans les scénarios testés.

Le modèle a permis d'étudier l'impact dynamique (dans le temps) du remplacement du charbon par du bois dans la production d'électricité. Premièrement, pendant l'abattage, le traitement et le transport et la combustion, la biomasse injecte au moins la quantité de carbone qu'elle contient. Les réductions n'interviennent qu'ensuite, si on procède au renouvellement de la biomasse récoltée. De plus, comme déjà noté dans des études antérieures, l'efficacité du bois est moindre que celle du charbon pour produire de l'énergie (le bois contient plus d'éléments inutiles, dont de l'eau) et à court terme, la combustion du bois émet plus de carbone que celle du charbon.

La dette carbone est remboursée, quand à un moment dans le futur, le bilan net des émissions et des absorptions s'équilibrent (les deux courbes se croisent). Avant, les émissions de dioxyde de carbone sont supérieures à ce qu'elles auraient été sans combus-

tion, ce qui contribue au forçage radiatif, au réchauffement de l'atmosphère et à des changements climatiques irréversibles à l'échelle de siècles.

Il peut aussi y avoir un phénomène indirect : avec une demande moindre pour le charbon, son prix baisse et peut pousser à construire plus de centrales au charbon ailleurs. D'ailleurs, 700 centrales au charbon sont programmées d'ici 2020. Mais l'étude n'en tient pas compte, dans l'esprit de choisir chaque fois les hypothèses les plus favorables à la combustion de la biomasse. Le bon sens ordinaire peut conduire à des erreurs supplémentaires : le remplacement de forêts existantes par des espèces à croissance plus rapide, comme des variétés de pins, peut aggraver l'impact du bois-énergie sur le climat. En effet, la densité de carbone des nouvelles plantations est inférieure à celle des forêts non exploitées, ce qui fait que le carbone séquestré dans les nouvelles forêts ne compense jamais le carbone émis par le bois des forêts qu'elles remplacent. Sans compter que qui dit plantation dit souvent engrais et oxydes d'azote. Bien que les conclusions du modèle ne l'explicitent pas, l'étude note aussi que l'effet cumulé de coupes répétitives et constate que l'industrie des plaquettes de bois en Amérique du Nord aggraverait le réchauffement climatique au moins jusqu'à la fin du siècle, même si elle cesse de croître en 2050.

● Scénarios et résultats

Dans chacun des huit scénarios étudiés, une impulsion d'un exajoule d'électricité finale produite à partir de plaquettes de bois l'année zéro rem-

La figure 1 montre les effets d'un seul abattage au temps zéro sur la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique (axe de gauche).

La figure 2 montre l'effet sur le dioxyde de carbone atmosphérique d'un abattage régulier (axe de droite)

Le cas de la figure 3 tirée de l'étude d'Holsmark est celui où un abattage d'arbres est effectué chaque année. Chaque année, il y a une impulsion d'émission d'une tonne de dioxyde de carbone et le début de la croissance des nouveaux arbres. La série de courbes en traits fins de la figure représente l'effet d'une série d'abattages annuels successifs. L'effet net sur le dioxyde de carbone dans l'atmosphère de cette série d'abattages est calculé en faisant la somme verticalement des courbes en traits fins, qui correspondent aux abattages annuels successifs, et de la courbe en traits en tirets, qui correspond au cas du premier abattage (valeurs sur l'axe vertical de gauche). La somme est représentée par le trait continu. On note que la courbe en tirets (un seul abattage) converge vers zéro alors que la courbe en trait continu décroît asymptotiquement vers une valeur qui est égale à 19 tonnes (en dehors du schéma, loin à droite). Ainsi, alors que dans le cas d'un seul épisode d'abattage, la dette carbone de l'abattage est compensée après quelques décennies, dans le cas d'une succession d'abattages, l'augmentation de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère est permanente et la dette n'est jamais remboursée. Le développement du bois-énergie en remplacement des énergies fossiles nécessite une exploitation continue des forêts bien gérées et correspond donc à ce cas.

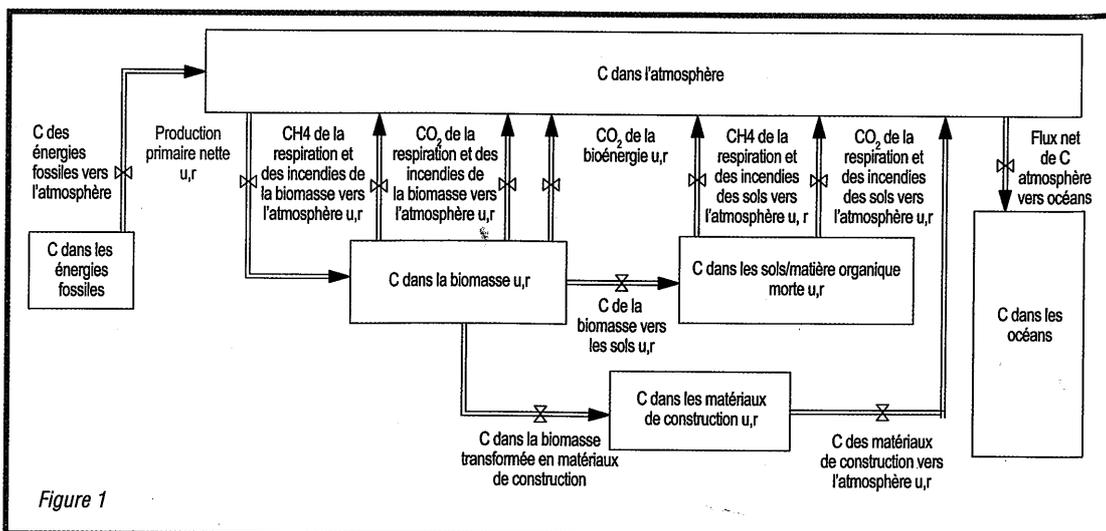


Figure 1

place un exajoule d'électricité finale produite à partir de charbon.

Dans le scénario de référence 0, le charbon est remplacé par l'éolien ou le solaire. 0,07 GtC sont laissés sous terre, ce qui se traduit par une réduction de 0,04 ppm de dioxyde dans l'atmosphère par rapport à l'utilisation de charbon.

Le scénario 1 correspond à l'hypothèse peu réaliste dans laquelle la bioénergie a la même efficacité, donc émet autant de carbone par unité d'énergie finale produite, que le charbon. 25 % de la bioénergie provient de l'entretien des forêts, sans abattage, on laisse la forêt repousser sans abattage ultérieur, sans incendie, maladie ou autre perturbation. Dans ce cas, il n'y a pas de modification immédiate de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Mais, au fur et à mesure que la forêt se reconstitue, du carbone est retiré de l'atmosphère pour être stocké dans les arbres et dans le sol. Au bout de cent ans, cela

résulte en une diminution de la concentration de dioxyde de carbone de 0,026 ppm, moins que dans le scénario 0.

Le scénario 2 prend l'hypothèse réaliste d'une efficacité moindre de l'approvisionnement et de la combustion des plaquettes de bois par rapport au charbon. Le mode d'obtention de la biomasse est la même que dans le scénario 1. Comme la production et la combustion de la biomasse émettent plus de dioxyde de carbone que dans le cas du charbon, il y a d'abord une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Dans ce cas, il faut 52 années pour que la dette carbone qui en résulte soit compensée par la croissance des arbres. Mais après cent ans, elle s'établit encore à 62 % de plus que le scénario de référence.

Le scénario 3 diffère du scénario 2 par l'abattage de 95 % de la forêt, ce qui correspond à une pratique en essor qui consiste à récolter des arbres entiers et tous les résidus. La superficie affectée n'est que d'un quart de celle du scénario 2. Malgré cela, la dette carbone n'est remboursée qu'au bout de 82 ans et au bout cent ans, la

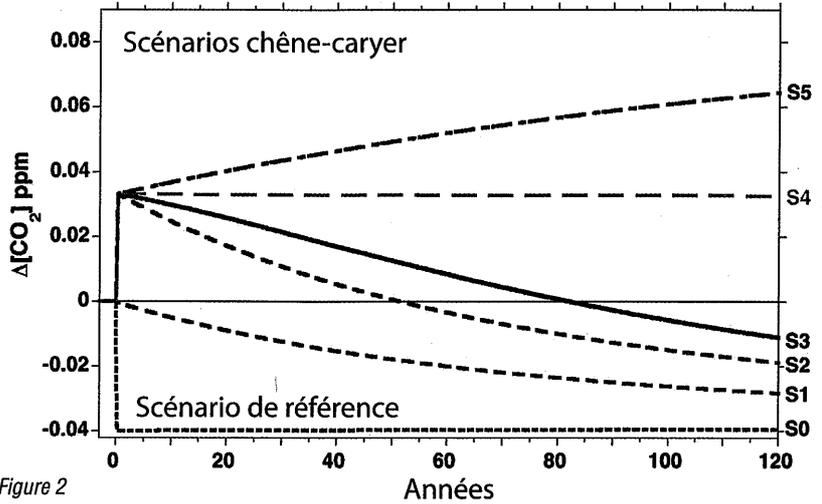


Figure 2

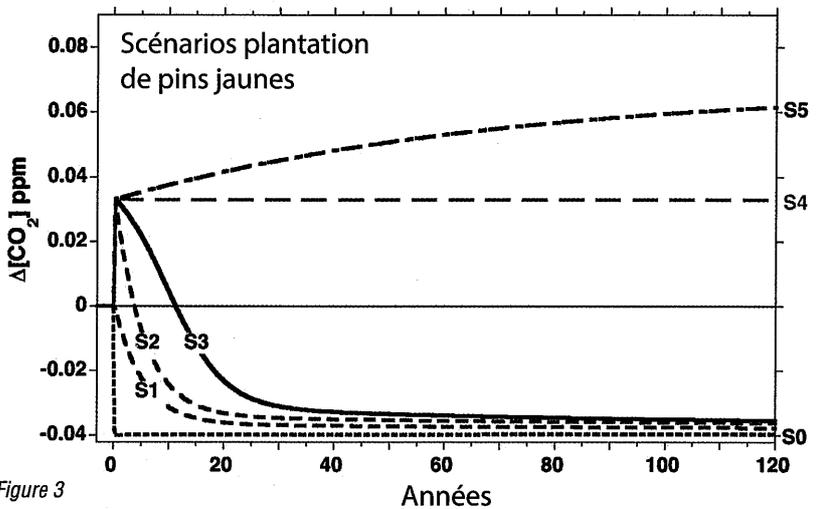


Figure 3

concentration dans l'atmosphère est encore supérieure de 86 % par rapport au scénario de référence.

Dans le scénario 4, on suppose qu'on ne laisse pas la forêt repousser, parce que le sol est réservé à d'autres utilisations et on suppose qu'il n'y a pas d'émission de carbone des sols ni de la matière organique morte dans l'at-

mosphère. Dans ce cas, la dette carbone n'est jamais remboursée.

Le scénario 5 diffère du scénario 4 par la prise en compte d'émissions de carbone depuis le sol et les matières organiques mortes. Sans croissance d'arbres, le flux de carbone vers la biomasse terrestre est nul. Au bout de cent ans, la concentration en dioxyde

de carbone a augmenté de 0,076 ppm, 2,3 fois plus que l'augmentation causée par l'impact initial dû à la combustion. À noter que dans les cas de nouvelles utilisations des sols, les scénarios ne tiennent pas compte des émissions de carbone supplémentaires qui pourraient provenir du labour, du développement urbain, d'émissions de méthane.

Dans le scénario 6, une forêt de chêne-caryer est utilisée comme bois-énergie, puis elle est remplacée par une plantation de pins jaunes. Le pin jaune pousse plus vite que le chêne. Ainsi, au début la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère diminue plus vite que si on avait replanté du chêne-caryer. Mais cet effet disparaît au bout de 20 ans et la concentration devient plus élevée dans le cas du pin par rapport au cas où la forêt aurait été reconstituée avec du chêne. Cela est dû au fait que les forêts de pins jaunes poussent plus vite, mais absorbent moins de carbone

par rapport à une forêt non exploitée pour la bioénergie (130 tC/ha au lieu de 211 tC/ha). Bien entendu, c'est encore pire si la forêt de pins jaunes est elle aussi exploitée pour la bioénergie, sans compter que dans ce cas, le sol s'épuise et qu'il faut utiliser des engrais.

Avec un coefficient de confiance de 95 %, le temps mis pour rembourser la dette carbone du bois-énergie dans le scénario 3 est compris entre 74 et 110 ans pour les bois durs et entre 11,25 et 12 ans pour les bois tendres. Au bout de cent ans, la diminution de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère n'est que la moitié de celle du scénario de référence (solaire ou éolien pour remplacer le charbon).

Le cas de la cogénération

La cogénération améliore l'efficacité de la production d'énergie finale, mais elle produit quand même une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, parce que l'efficacité reste moindre pour le bois que pour le charbon.

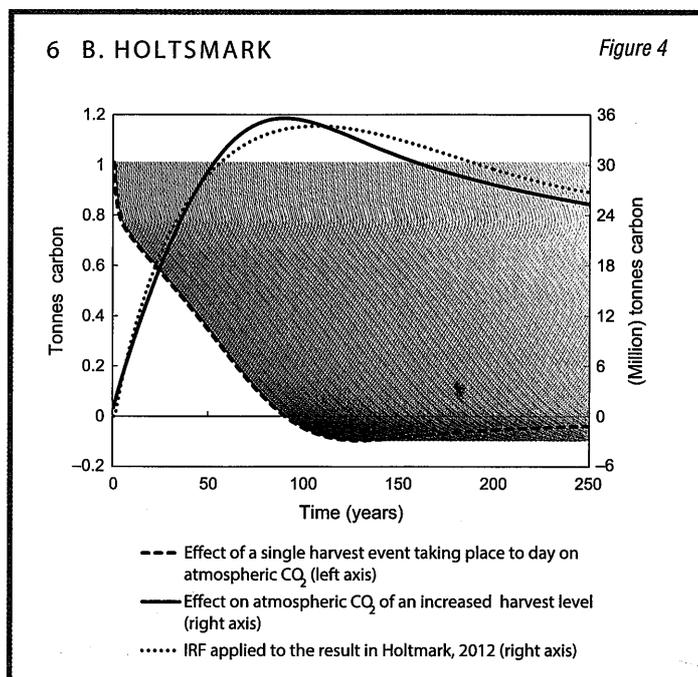


Figure 4

● Le bois-énergie comme industrie

Dans les scénarios 1 à 6, on considère une seule impulsion d'émission de dioxyde de carbone. Les scénarios 7 et 8 traitent le cas de coupes répétées d'année en année et donc de l'effet cumulé des émissions unitaires. C'est le cas que traitait l'étude de B. Holsmark en 2015. Cette étude de 2015 donnait des résultats similaires à l'étude actuelle dans le cas d'une impulsion, mais elle montrait que dans le cas de coupes répétées, ce qui se produit quand on gère bien une forêt pour le bois-énergie, la dette carbone du bois-énergie n'était jamais remboursée.

Le scénario 7 de la présente étude montre ce qui se passe avec une croissance continue au-delà de 2030 de l'utilisation de la bioénergie et le scénario 8 avec un arrêt de la bioénergie en 2050. Le résultat qualitatif est que, quels que soient les paramètres, l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone se poursuit tant que l'absorption de carbone de l'atmosphère par la croissance des arbres est inférieure aux émissions dues aux combustions initiales annuelles de biomasse, plus les émissions ultérieures de la biomasse et du sol. Autrement dit, tant que la bioénergie continue d'émettre une impulsion de carbone chaque année, la dette en carbone ne peut qu'augmenter, et elle n'est donc pas remboursée.

Dans le scénario 8, la biomasse n'est plus utilisée au-delà de 2050. La concentration en dioxyde de carbone continue à augmenter pendant encore 56 ans et elle ne retrouve son niveau initial que 144 ans après l'arrêt de l'exploitation. ●

Sources :

Does replacing coal with wood lower CO₂ emissions?

Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy John D Sterman¹, Lori Siegel² and Juliette N Rooney-Varga³.

¹ MIT Sloan School of Management

² Climate Interactive, Washington, DC, 20036, United States of America

³ UMass Lowell Climate Change Initiative and Department of Environmental, Earth, and Atmospheric Sciences, United States of America <http://bit.ly/enretdsterman>

Bjart Holsmark, "The outcome is in the assumptions: analyzing the effects on atmospheric CO₂ levels of increased use of bioenergy from forest biomass," published in *Global Change Biology in 2012* <http://bit.ly/enrddhostsmark>

LE POTENTIEL DANGER DES INTELLIGENCES SURHUMAINES

Entre l'idée de superintelligences menaçantes et celle, plus sympathique, de machines qui ne seraient que notre prolongement, laquelle est la plus vraisemblable?

L'AUTEUR



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



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

Un exploit étonnant vient d'être réalisé dans le domaine des recherches en intelligence artificielle (IA). Le programme AlphaZero, conçu et programmé par David Silver et son équipe de la société DeepMind, apprend seul, en jouant contre lui-même et en ne connaissant que les règles, à jouer aux échecs, au go ou au shogi (échecs japonais). Il a dépassé le niveau des meilleurs joueurs humains dans ces trois jeux.

L'exploit est un formidable progrès: l'ordinateur Deep Blue, qui a battu en 1997 le champion du monde d'échecs Gary Kasparov, combinait de bons algorithmes et une connaissance experte des ouvertures de jeu, des fins de partie et de l'évaluation des configurations, ces expertises provenant des meilleurs joueurs humains qui avaient en quelque sorte « instruit le programme ».

Avec AlphaZero, plus besoin d'experts humains transmettant un savoir patiemment acquis; pour ce type de jeux, l'IA travaille seule et obtient mieux que ce à quoi aboutissent des siècles de concentration humaine. Les chercheurs qui ont mis au point AlphaZero précisent: « Nous avons appliqué AlphaZero aux jeux d'échecs, de shogi, ainsi qu'au go, en utilisant le même algorithme et la même architecture réseau pour les trois jeux. Nos résultats démontrent qu'un algorithme polyvalent d'apprentissage par renforcement [l'algorithme favorise les choix qu'il fait quand il gagne] peut apprendre, *tabula rasa*, sans connaissances ni données humaines spécifiques. »

À mesure que l'intelligence artificielle progresse, des questions de plus en plus pressantes sont formulées à son sujet. Certains chercheurs et philosophes qualifiés parfois de technoprophètes nourrissent le débat et proposent des visions du futur, variées et contradictoires. Qu'on s'en réjouisse ou qu'on le craigne, nul ne doute que les machines intelligentes, peut-être mises en réseaux ou fusionnées aux humains, façonneront notre avenir.

Parmi ces penseurs qui tentent de déchiffrer le futur, citons Nick Bostrom, Ray Kurzweil, Ben et Ted Goertzel, Hans Moravec, Francis Heylighen, Hugo de Garis, et Clément Vidal. Tous réfléchissent à ce que pourrait être une intelligence artificielle supérieure et à son attitude face à l'humanité.

EXCÈS D'HONNEUR ET INDIGNITÉ

Comme souvent quand on comprend mal un sujet, on procède par excès et, selon son tempérament, on voit exclusivement le verre à moitié vide ou le verre à moitié plein. Pour reprendre les mots que Racine met dans la bouche d'un de ses personnages, l'IA ne mérite cependant ni l'excès d'honneur qu'on lui accorde ni l'indignité liée à la crainte qu'elle suscite.

L'étonnement face aux succès obtenus et la prise de conscience des impacts que cela aura ne doivent pas faire perdre le sens de la mesure. L'IA réussit magnifiquement dans de nombreuses tâches spécialisées, mais reste encore démunie pour tout ce qui demande du sens commun, comme la traduction automatique

d'œuvres littéraires. La conduite automatisée de véhicules a récemment donné lieu à beaucoup de rêves, alors que les spécialistes annoncent prudemment qu'on ne fera de voitures totalement autonomes, où vous vous asseyez à l'arrière et lisez votre journal, que dans cinquante ans au mieux (voir S. Shladover, «La voiture en quête d'autonomie», *Pour la Science* n°466, août 2016).

Dans un article de cette rubrique, je mentionnais aussi les méthodes conduisant à flouer les réseaux de neurones profonds destinés à la classification d'images, ce qui conduit à ce qu'ils croient reconnaître une autruche quand on leur présente une photo où tout humain voit clairement un camion (*Pour la Science* n°488, juin 2018).

Aujourd'hui, ce domaine de recherche qui n'a pas une définition et une délimitation précises, réussit magnifiquement dans des tâches spécialisées de plus en plus nombreuses, mais rencontre deux obstacles principaux. D'une part, l'IA obtient ses résultats sans procéder comme le font les humains pour les mêmes tâches, mais en s'aidant de dispositifs techniques et de calculs dont se passent les humains: radars et lasers pour les voitures partiellement autonomes, capacités colossales de calculs et de mémorisation qui n'ont rien d'équivalent dans les cerveaux humains. D'autre part, les succès obtenus ne se combinent pas, et l'IA ne sait pas aujourd'hui former des systèmes cohérents associant les capacités spécialisées maîtrisées pour constituer des êtres autonomes doués de sens commun et dont on puisse raisonnablement soutenir qu'ils ont conscience d'eux-mêmes, possèdent une forme de sensibilité, de l'humour et des personnalités structurées et robustes.

ANNONCES PRÉMATURÉES ET SINGULARITÉ

En 1958, Herbert Simon, qui a reçu en 1978 le prix d'économie en mémoire d'Alfred Nobel, annonçait que l'ordinateur battrait le champion humain aux échecs dans les dix années à venir. Il avait raison sur la possibilité d'un tel exploit, mais pas sur la durée d'attente: il a fallu quarante ans pour que sa prédiction se réalise.

En 1966, Irving Good, statisticien reconnu qui conseilla Stanley Kubrick pour son film *2001, l'Odyssée de l'espace*, annonçait l'avènement vers l'an 2000 d'une superintelligence artificielle au moins équivalente à l'intelligence humaine. Elle n'est pas encore là et ceux qui prévoient sa venue ont reculé l'échéance. Raymond Kurzweil, aujourd'hui directeur de l'ingénierie chez Google, et Peter Diamandis, cofondateur et président de la Singularity University (une société privée californienne), évoquent 2030, alors que Ted et Ben Goertzel,

chercheurs en IA, pensent plutôt qu'il faudra attendre 2040, voire 2100.

Il se pourrait que l'on se trouve dans une situation analogue à celle du jeu d'échecs: on y arrivera, mais pas dans les délais annoncés, car le problème est réellement difficile, ce que l'on découvre année après année. Le plus raisonnable serait sans doute de ne pas tenter aujourd'hui de pronostics!

Liée à cette éventuelle superintelligence artificielle, l'idée d'une «singularité» à venir est évoquée sans qu'on puisse savoir vraiment de quoi il s'agit. Une date où se situerait une sorte d'asymptote verticale dans la courbe mesurant le niveau des intelligences artificielles créées sur Terre? Un point où les machines écrasent les humains prendraient le pouvoir? Un instant au-delà duquel il est impossible de comprendre ce qui va se passer à cause des bouleversements entraînés par l'existence d'intelligences artificielles nous dépassant?

Tout cela n'est pas très sérieux, même en prenant en compte la célèbre «loi de Moore» (vérifiée en gros depuis cinquante ans) qui indique un doublement de capacité des dispositifs informatiques tous les dix-huit mois ou deux ans. D'une part, une fonction exponentielle comme celle envisagée par la loi de Moore n'a pas d'asymptote verticale. D'autre part, dans notre monde physique, toute croissance exponentielle rencontre rapidement des obstacles qui l'arrêtent et personne ne défend sérieusement que la loi de Moore (qui s'essouffle déjà) continuera à être valide indéfiniment. Dernier point: l'augmentation des capacités de calcul et de mémoire ne constitue pas la garantie qu'on saura les utiliser pour créer cette fameuse intelligence générale qui nous résiste.

Les annonces des Gafam (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft) sur ces sujets doivent être examinées avec méfiance. Certains spécialistes comme Jean-Gabriel Ganascia, président du comité d'éthique du CNRS et lui-même chercheur en intelligence artificielle, sont plus rigoureux et lucides que les agents publicitaires des firmes de technologie. Jean-Gabriel Ganascia considère que ceux-ci cherchent à promouvoir un projet du dépassement de la politique et des États-nations par des entreprises à l'avidité sans borne. L'idée de la singularité, utilisée pour amuser et effrayer, aurait en réalité surtout pour but d'intimider et de masquer leurs ambitions dominatrices.

Les difficultés à anticiper avec précision n'interdisent pas de s'adonner au jeu de l'anticipation en s'interrogeant sur l'apparition d'une superintelligence artificielle, quitte pour cela à imaginer plusieurs scénarios, sans donner d'échéances et en envisageant qu'éventuellement aucun ne se réalise. Jouons,

Nick Bostrom définit dans son livre une superintelligence comme tout intellect qui

excède radicalement les capacités cognitives humaines et ce dans tous les domaines. Deux hypothèses assez différentes sont envisagées.

(a) Les machines à base de silicium, y compris les ordinateurs quantiques s'ils se révèlent utiles, progressent au point que les dispositifs construits nous égalent et nous dépassent dans toutes les tâches intellectuelles possibles, cela, comme pour AlphaZero, sans que nous soyons associés directement à leur fonctionnement et sans que des éléments biologiques aient été fusionnés ou connectés à ces créatures intelligentes artificielles.

(b) Seule une association entre des éléments (humains ou non) provenant de la biologie et des dispositifs informatiques, donc un mixte de technologies inventées par l'homme et de parties utilisant ce que la vie sur Terre a patiemment élaboré, réussit ce dépassement.

ARTILECTS OU CYBORGS?

Les êtres intelligents provenant de l'hypothèse (a) sont dénommés *artilects* (pour *artificial intellect*) par Hugo de Garis, un chercheur qui a développé un scénario pour le futur sur lequel nous allons revenir.

La science-fiction a envisagé l'hypothèse (b) depuis longtemps et dénommé cyborgs (pour *cybernetic organisms*) ces êtres hybrides superintelligents grâce au mélange et à l'imbrication de biologie et d'informatique. Imaginons par exemple que, pour suppléer à notre mémoire insuffisante, on nous greffe des puces contenant des téraoctets de données qui nous permettraient directement par la pensée de savoir tout ce qu'il y a dans l'encyclopédie Wikipédia, et que grâce à un module de calcul mathématique lui aussi accessible instantanément par la pensée, nous sachions répondre à n'importe quelle question du type «Combien fait 7^{20} ?» ou «Quelle est la dérivée cinquième de $\sin(\cos(x))$?» Notre intelligence en serait accrue!

Une troisième hypothèse est parfois évoquée, celle d'un cerveau planétaire naissant des réseaux de machines qui s'échangent des informations et constituent une sorte d'être décentralisé et pensant; nous y reviendrons.

LE PESSIMISME DE HUGO DE GARIS

Pour Hugo de Garis, «la société se divisera en trois groupes philosophiques majeurs, agressivement opposés. Le premier groupe sera constitué par les *cosmistes* (terme dérivé du mot *cosmos*), favorables à la construction d'artilects. Le deuxième groupe sera constitué des *terrans* (dérivé du mot *Terra*, la Terre) opposés à la construction d'artilects. Le troisième groupe sera celui des *cyborgistes*, qui souhaitent devenir eux-mêmes des artilects en ajoutant des composants à leur propre cerveau humain.»

> Dans son livre *The Artilect War*, ouvrage intermédiaire entre science-fiction et essai sérieux de futurologie, Hugo de Garis considère inévitable une guerre entre ces groupes. Pour lui, elle sera plus sanglante encore que toutes celles ayant eu lieu sur Terre et provoquera au cours du XXI^e siècle des hécatombes de plusieurs milliards de morts. Cette guerre a peu de chance de s'achever en faveur des terrans qui, s'ils veulent gagner, doivent agir rapidement avant que les deux autres groupes, capables de s'associer, comprennent qu'ils sont menacés par les terrans. Dans un entretien diffusé sur Discovery Channel, Hugo de Garis a exprimé son inquiétude: «Je suis content d'être en vie maintenant. Je mourrai sans doute paisiblement dans mon lit. Cependant, je crains vraiment pour mes petits-enfants. Ils seront mêlés à la guerre d'Artilect et seront probablement détruits par elle.»

Assez curieusement, les transhumanistes, peu appréciés en France, où la très grande majorité des articles et livres qui les mentionnent le font pour les condamner ou s'en moquer, défendent des idées bien optimistes comparées à cette guerre annoncée par Hugo de Garis. Les transhumanistes soutiennent l'idée qu'il faut aller, sans retenue, vers l'augmentation et le perfectionnement technique des humains et non seulement porter des lunettes, des prothèses auditives ou des *pace-makers*, mais utiliser tout ce qu'on pourra pour allonger nos vies, renforcer nos capacités intellectuelles et physiques. En clair, ils sont favorables à l'idée des cyborgs, et seraient donc dans le camp cyborgiste tentant de s'associer aux cosmistes pour éviter d'être préventivement éliminés par les terrans.

Concernant ce qui pourrait se passer entre cyborgistes et cosmistes, les avis des transhumanistes et de Hugo de Garis divergent. La plupart des transhumanistes envisagent la possibilité d'une coexistence entre les cyborgs en partie humains et les machines devenues superintelligentes sans composants biologiques. Les transhumanistes croient que le fait d'associer des éléments vivants (eux en particuliers) et la technologie électronique permettrait de maintenir dans la compétition les humains augmentés qui, peut-être devenus immortels, resteraient la clé du futur de l'humanité.

Hugo de Garis défend le contraire: à côté des capacités que pourraient acquérir les artilects, le projet transhumaniste ne fait pas le poids. Pour lui, la voie du mélange du vivant avec le futur des technologies informatiques est une illusion: les artilects n'auront que faire des hybrides monstrueux que seraient devenus les humains modifiés et s'en débarrasseront.

Nick Bostrom, cofondateur de la World Transhumanist Association, n'est pas persuadé

que les artefacts adopteront une attitude pacifique envers leurs créateurs humains éventuellement devenus cyborgs. Il nous incite à surveiller nos créations intelligentes futures qu'il voit comme des menaces. L'ouvrage de Nick Bostrom a été lu par Elon Musk, Bill Gates et Robin Li (du géant chinois Baidu) et semble les avoir ébranlés, ce qui les a amenés à répandre un message de crainte et des mises en garde à propos de nos futures IA.

Pour Hugo de Garis, il n'y aura pas d'intelligence artificielle amicale tolérante aux humains ou même aux cyborgs: «L'idée d'une queue qui remue le chien est évidemment ridicule. Un chien est beaucoup plus gros que sa queue, donc la queue ne peut pas remuer le chien. C'est pourtant ce que proposent les transhumanistes: les artefacts (esprits artificiels, machines massivement intelligentes) resteraient amicaux avec les humains. [...] Je trouve cette conception arrogante et naïve. Elle suppose que les êtres humains sont suffisamment intelligents pour anticiper les motivations d'une créature disposant de capacités des milliards de milliards de fois supérieure à celles humaines.»

AUTRES SCÉNARIOS, AUTRES ARGUMENTS

La position de Hugo de Garis semble aveugle à un mouvement qui enlèverait tout sens à l'idée de guerre exterminatrice: la construction d'un superorganisme mondial associant et liant tous les êtres qui, à la surface du globe, ne seraient pas en concurrence, mais associés.

Cette idée d'une unité à l'échelle globale est en général considérée comme religieuse. Elle est présente dans la philosophie bouddhiste et chez le philosophe jésuite Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), qui a évoqué une convergence vers la «noosphère», une «pellucule de pensée enveloppant la Terre, formée des communications humaines».

Le philosophe belge Francis Heylighen défend l'idée que la superintelligence sera distribuée à travers le réseau Internet, qui fonctionnera comme un supercerveau: «Ce cerveau mondial relèvera tous les défis auxquels est confronté le superorganisme mondial. Ses capacités iront bien au-delà de nos capacités actuelles. Il possédera les attributs divins: omniscience (il saura tout ce qu'il faut pour résoudre nos problèmes), omniprésence (il sera présent partout, à tout moment), omnipotence (il pourra produire n'importe quelle chose ou service de la manière la plus efficace) et omnibienveillant (il visera le plus grand bonheur pour le plus grand nombre).» L'exact opposé du pessimisme de Hugo de Garis!

Clément Vidal, philosophe, spécialiste de cosmologie à la Vrije Universiteit de Bruxelles,

rappelle la phrase du poète William Stafford que «toute guerre fait deux perdants» et que la violence est le plus souvent irrationnelle. Steven Pinker détaille cette pacification du monde qui, même si on la trouve bien trop lente, se mesure et s'explique. D'une part, l'interdépendance de tous vis-à-vis de tous nous lie, qu'on le veuille ou non. Des arguments de théorie des jeux et des simulations informatiques sur la base du modèle du dilemme des prisonniers s'ajoutent à cette analyse des faits. Ils montrent que la coopération est l'issue rationnelle de nombreuses configurations sociales et politiques.

CONVERGENCE DES BUTS

L'éthique de la complexité (voir cette rubrique dans Pour la Science de septembre 2018) est un dernier argument montrant qu'une convergence des motivations aboutissant à une unification des intérêts de tous sur Terre n'est pas absurde. Si tous les êtres intelligents choisissent de servir un ensemble de valeurs universelles communes comme cette éthique l'envisage, alors ils agiront avec des objectifs partagés et les raisons de mener des guerres cesseront d'opérer.

Bien sûr, quoique convergents, ces divers d'arguments ne constituent pas une preuve définitive que lorsque des superintelligences existeront sur Terre (si cela se produit), alors elles formeront avec nous les humains, devenus plus ou moins cyborgs, un tout pacifié sans qu'aucune partie ne tente d'en éliminer d'autres. Il me semble cependant que l'on peut défendre l'idée très simple que l'humanité n'est pas simplement l'addition des corps biologiques présents sur Terre, mais l'ensemble de tout ce qu'elle a produit et même de tout ce qui lui permet d'y vivre. Ce corps collectif qu'est la Terre évoluant vers plus d'intelligence et des liens de plus en plus resserrés et unis, en particulier par les multiples réseaux récemment déployés à la surface du globe, ne déclenchera probablement jamais cette guerre interne imaginée par Hugo de Garis, qui serait une forme d'automutilation, voire de suicide.

Nous sommes là maintenant au-delà de la science-fiction; cependant, prenons garde de ne pas condamner toute réflexion sur ces questions en les considérant comme stupides et prématurées. AlphaZero nous montre que ce que nous arrivons à tirer de nos machines est incroyable: l'intelligence artificielle cesse progressivement d'être un rêve. Par ailleurs, le développement des réseaux de toutes sortes tisse un cocon dense de liens entre tous les acteurs présents dans le monde. Sans le moindre doute, il se construit une structure nouvelle où tout dépend de tout et dont nous ne sommes, comme nos machines intelligentes, que des composants. ■

BIBLIOGRAPHIE

Wikipédia, **La singularité technologique**, consulté en décembre 2018.

D. Silver et al., **A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play**, *Science* vol. 362, pp. 1140-1144, 2018.

J.-G. Ganascia, **Le Mythe de la singularité**, Seuil, 2017.

N. Bostrom, **Superintelligence**, Dunod, 2017.

S. Pinker, **La Part d'ange en nous**, Les Arènes, 2017.

B. et T. Goertzel (dir.), **The End of the Beginning: Life, Society and Economy on the Brink of the Singularity**, Humanity+ Press, 2015.

H. de Garis, **The Artefact War - Cosmists vs. Terrans**, ETC Publications, 2005.

L'électrolyse de l'eau en quête de performance... et donc d'électrocatalyseurs

La production énergétique à partir des énergies renouvelables (solaire, éolien, etc.) est largement limitée par leur caractère délocalisé et leur intermittence. Leur stockage à grande échelle est ainsi plus que jamais un des enjeux sociétaux majeurs. Pour cela, de nombreux systèmes de stockage sont disponibles, chacun répondant à une problématique en termes de densité d'énergie et de moyens de distribution. Parmi ceux-ci, l'hydrogène de par sa forte densité d'énergie massique (39 kWh/kg, soit trois fois supérieure à celle d'un litre d'essence) apparaît depuis longtemps comme un vecteur énergétique intéressant. De plus, l'hydrogène peut non seulement servir de vecteur énergétique, mais celui-ci est aussi primordial pour le procédé Haber-Bosch servant à la synthèse de l'ammoniac NH_3 (procédé responsable d'environ 2 % de la consommation énergétique annuelle). Cet attrait a ainsi poussé de nombreuses recherches sur l'électrolyse de l'eau ($2 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$) comme moyen propre de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables.

Cependant, le développement de l'électrolyse comme méthode de production efficace à grande échelle de l'hydrogène (celle-ci représente moins de 1 % de la production globale d'hydrogène) dépendra largement des progrès futurs dans le design de nouveaux catalyseurs pour la réaction d'électro-oxydation de l'eau et de dégagement de l'oxygène. En effet, cette réaction ($2 \text{H}_2\text{O} = \text{O}_{2(\text{g})} + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$) est la source d'électrons pour la réaction d'électro-réduction de l'eau et de formation de dihydrogène ($2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- = \text{H}_{2(\text{g})}$).

De plus, l'importance de cette réaction va au-delà de l'électrolyse de l'eau, puisque celle-ci sert aussi de source d'électrons pour des réactions comme l'électro-réduction du CO_2 et la production de petites molécules à haute valeur ajoutée comme CO ou les aldéhydes, ou encore l'électrosynthèse de l'ammoniaque *via* la réduction électrochimique de l'azote en milieu protique.

La réaction d'oxydation de l'eau et de dégagement de l'oxygène est une réaction complexe, qui fait intervenir l'échange de quatre protons et quatre électrons en plusieurs étapes successives. Elle nécessite l'utilisation d'électrocatalyseurs qui, sous ces conditions extrêmement oxydantes, sont des oxydes de métaux de transition. En surface de ces oxydes, différents intermédiaires sont formés à chaque étape élémentaire de la réaction (figure 1b). Afin de diminuer les pertes énergétiques liées à cette réaction, il s'agit donc de contrôler les barrières énergétiques nécessaires pour former ces intermédiaires et limiter les surtensions associées à cette réaction [1]. L'activité de ces catalyseurs suit donc le principe de Sabatier selon lequel l'énergie de formation de ces intermédiaires ne doit pas être trop faible afin de faciliter leur formation, ni trop forte pour ne pas pénaliser la formation de l'intermédiaire suivant [2] ; un optimum est donc obtenu suivant une courbe dite de type « volcan » (figure 1c). Des travaux récents ont pu montrer à l'aide de calculs *ab initio* que les énergies de ces différents intermédiaires sont corrélées les unes aux autres, empêchant l'obtention d'une surtension nulle pour cette

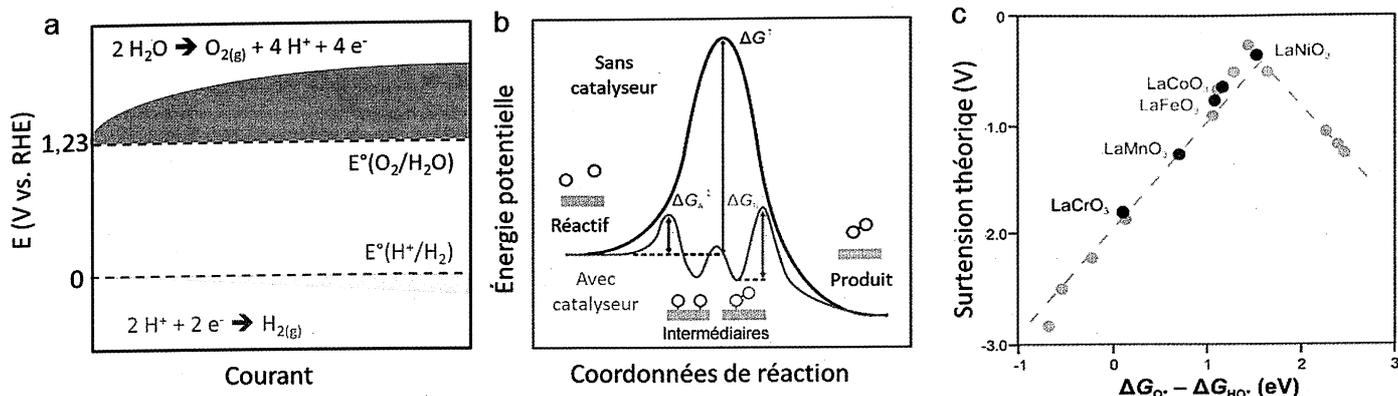


Figure 1 - a) Représentation schématique du potentiel devant être appliqué pour oxyder l'eau et la réduire en fonction de la densité de courant, montrant la très large surtension nécessaire pour la réaction d'oxydation de l'eau. b) Schéma représentant la formation d'intermédiaires de réaction en surface de catalyseurs hétérogènes et régulant la barrière d'activation ΔG^\ddagger de la réaction électrocatalytique. c) Courbe dite de type « volcan » montrant l'évolution de l'activité électrocatalytique de métaux de transition de type pérovskite en fonction de l'énergie de formation de l'intermédiaire réactionnel O^\bullet depuis HO^\bullet . Reproduit d'après [2] avec permission de la Royal Society of Chemistry.

réaction [3]. Ainsi, pour les meilleurs catalyseurs développés à ce jour, une surtension d'environ 200 mV est toujours observée, surtension qu'il faut mettre en perspective vis-à-vis de la surtension quasi nulle mesurée pour la réaction de réduction de l'eau et de dégagement de l'hydrogène en surface du platine, par exemple.

Atomes de cœur, atomes de surface

Afin de casser ce plafond de verre, mes efforts se sont tournés vers la compréhension et le développement de nouveaux mécanismes réactionnels. Ainsi, notre vision basée sur la simple adsorption/désorption des espèces intermédiaires en surface du catalyseur a pu être remise en cause en démontrant que les atomes de cœur du catalyseur peuvent aussi participer à la réaction [4-7]. Pour démontrer cela, les catalyseurs ont été marqués à l'aide de l'isotope ^{18}O de l'oxygène et des mesures d'oxydation de l'eau ont été réalisées avec de l'eau non marquée (H_2^{16}O) [8]. En suivant cette expérience à l'aide de mesures *operando* par spectrométrie de masse, un phénomène jusque-là négligé a été mis en évidence. En effet, alors que la réaction de dégagement d'oxygène ne devrait produire que de l'oxygène provenant de l'oxydation de l'eau, une quantité non négligeable d'oxygène provenant du catalyseur lui-même est détectée pour les matériaux les plus actifs. En d'autres termes, les atomes du catalyseur participent à la réaction d'oxydation de l'eau. Ainsi, les oxygènes de surface sont oxydés pendant la réaction et servent de sites actifs (figure 2) selon un schéma réactionnel rappelant le mécanisme de type Mars van Krevelen précédemment mis en avant pour la réaction d'oxydation de CO en phase gazeuse [9].

De plus, les oxygènes de cœur peuvent aussi participer à la réaction par diffusion jusqu'à la surface lors de la réaction et une corrélation est obtenue entre l'activité électrocatalytique d'oxydes de cobalt vis-à-vis de l'oxydation de l'eau et la quantité d'oxygène du cœur de ces oxydes participant à la réaction, le catalyseur le plus actif étant SrCoO_3 . En couplant ces études avec des analyses par microscopie électronique en transmission (MET), nous avons déduit ensuite que de nombreux efforts seront nécessaires afin de parfaitement contrôler ce mécanisme. En effet, il a pu être mis en avant que la surface des oxydes de métaux de transition démontrant les meilleures performances évolue très souvent au cours du fonctionnement et qu'une nouvelle couche se forme (figure 3) [11-12]. Il apparaît que l'épaisseur de cette couche varie selon les

conditions et que la cristallinité initiale du catalyseur est perdue, ce qui a pu être expliqué par des analyses dispersives en énergie qui révèlent que la composition chimique de la surface évolue elle aussi pour devenir riche en métaux de transition et pauvre en alcalinoterreux ou terres rares qui constituent les catalyseurs de cette réaction [11]. En couplant ces observations à des mesures de spectrométrie d'absorption des rayons X [13-14], il a pu être démontré que l'arrangement cristallin de cette couche surfacique est modifié par rapport à l'arrangement de cœur du catalyseur. En définitive, les analyses chimiques et structurales révèlent que cette couche surfacique amorphe est composée de motifs ressemblant à ceux des oxyhydroxydes de métaux de transition, tels que CoOOH ou NiOOH . Ainsi, lors du mécanisme impliquant l'oxydation du réseau d'oxygène et la mise en solution des métaux

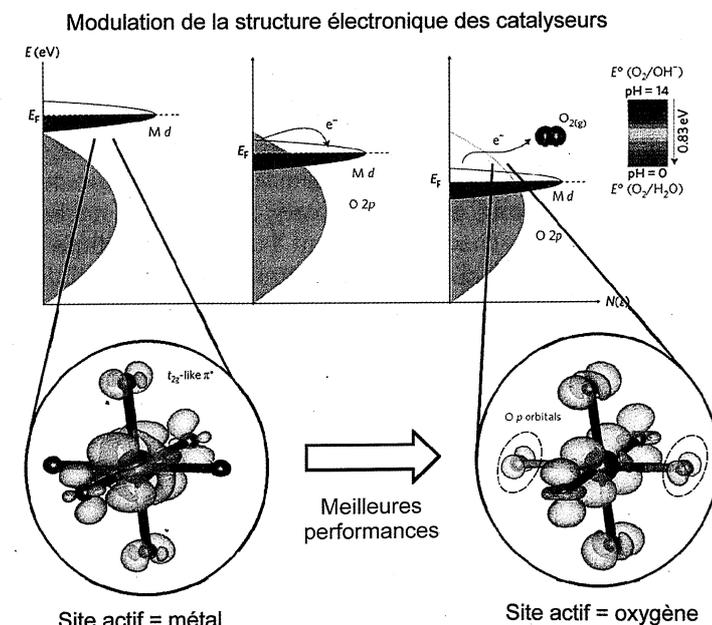


Figure 2 - En haut : représentation schématique de la densité d'états pour les oxydes de métaux de transition, avec le niveau de Fermi E_F par rapport aux niveaux 3d du métal de transition (bleu) et les niveaux 2p du ligand oxygène (rouge). Lorsque le niveau de Fermi atteint les niveaux énergétiques du ligand oxygène, celui-ci devient le site actif pour la réaction d'oxydation de l'eau et de dégagement de l'oxygène, entraînant une amélioration des performances du catalyseur. En insert sont représentées les modifications de la densité électronique calculée pour un octaèdre Ir^{3+}O_6 (gauche) et Ir^{6+}O_6 dans la structure pérovskite montrant la polarisation d'une orbitale anti-liante Ir-O à fort caractère métallique sous oxydation (gauche), soulignant que le métal est le site actif, et la polarisation d'une orbitale non liante de l'oxygène qui devient ainsi le site actif pour l'oxydation de l'eau (droite). Reproduit d'après [7] et [10] avec permission.

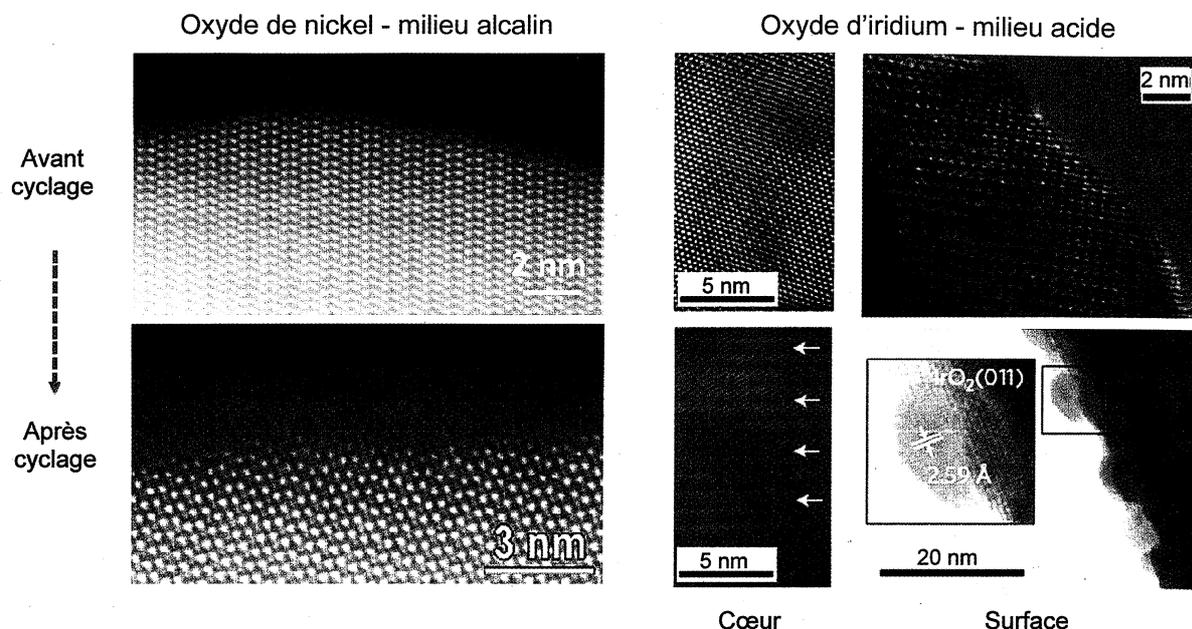


Figure 3 - Images par microscopie électronique en transmission (MET) réalisées avant cyclage (haut) et après cyclage (bas) pour $\text{La}_2\text{Li}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_{4+\delta}$ utilisé comme catalyseur en milieu alcalin (gauche) et $\text{La}_2\text{LiIrO}_6$ utilisé comme catalyseur en milieu acide (droite). Pour ces deux catalyseurs, la surface est modifiée après cyclage et pour $\text{La}_2\text{LiIrO}_6$ (droite), une migration atomique est observée depuis le cœur du matériau vers la surface. Reproduit d'après [10] et [12] avec permission.

de transition, ceux-ci précipitent en milieu alcalin sous forme d'hydroxydes ou d'oxyhydroxydes (figure 3, gauche), selon le potentiel appliqué et suivant le diagramme de Pourbaix du métal considéré. Un équilibre s'établit donc pour lequel les métaux de transition sont dissous puis, de par leur faible solubilité en milieu alcalin, constamment redéposés aux potentiels élevés appliqués pour la réaction d'oxydation de l'eau.

Nous avons ainsi pu démontrer qu'une seule et même espèce chimique est à l'origine du mécanisme faisant participer les atomes de cœur du catalyseur ainsi que de cette relative instabilité de la surface des catalyseurs les plus actifs. En effet, en fonction de la structure électronique du catalyseur, des oxygènes de surface peuvent être oxydés pour former des espèces électrophiles réactives (figure 2) [6-7, 10]. Ces espèces électrophiles servent ainsi de sites actifs pour l'oxydation de l'eau et le dégagement d'oxygène et sont consommées lors de la réaction, diminuant ainsi la coordination des métaux de transition en surface du catalyseur. Lorsque la cinétique de remplissage par les ions OH^- de ces lacunes d'oxygène ainsi créées est plus lente que leur cinétique de formation, la surface devient instable et des clusters de cations chargés sont libérés en solution avant de se redéposer sous formes d'hydroxydes en conditions alcalines.

Nous avons de plus pu montrer que le même intermédiaire commun (oxygène électrophile de surface) est aussi responsable de la dégradation électrochimique des électrocatalyseurs en milieu acide [10]. Cependant, la solubilité des métaux de transition est bien plus élevée en milieu acide qu'en milieu alcalin [15], et seuls les catalyseurs à base d'iridium présentent une stabilité suffisante pour être envisagés dans des électrolyseurs à membrane polymère conductrice protonique. De nombreux travaux dont les nôtres [16] se penchent ainsi sur l'analyse et la compréhension de ces vitesses de dissolution, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de nanogrammes d'iridium dissous par seconde et par cm^2 de catalyseur, et sur l'estimation du temps de vie des catalyseurs à base d'iridium [17]. Il apparaît que l'oxyde d'iridium IrO_2 préparé à haute température atteint une durée de vie allant jusqu'à dix ans alors que des oxydes plus complexes tels que les pérovskites

présentent des durées de vie de l'ordre du mois (figure 3, droite). Cependant, en jouant sur le type de substrat utilisé afin de supporter les catalyseurs, ces temps de vie peuvent être améliorés. De plus, une structuration du catalyseur sous forme mésoporeuse permet de limiter l'impact de cette dissolution sur la durée de vie du catalyseur [18], en accélérant la redéposition de l'iridium et en évitant ainsi une perte trop grande de matière. Des progrès de mise en forme permettront donc d'améliorer les performances et la durabilité des catalyseurs en milieu acide.

L'électrocatalyseur de rêve !

Forts de cette compréhension nouvelle, nos récents travaux s'attachent à explorer le rôle de la structuration de l'eau sur le contrôle des cinétiques de dégagement de l'oxygène, mais aussi sur la stabilité du catalyseur [19-21]. En effet, les ions présents en solution peuvent interagir avec les sites actifs de surface et ainsi moduler grandement leur activité. Ceci est particulièrement vrai pour le fer qui est présent sous forme d'impuretés dans les solutions alcalines et qui améliore fortement l'activité électrocatalytique des catalyseurs à base de cobalt ou de nickel [19]. De même, le pH et donc la concentration en OH^- influe grandement sur la cinétique d'oxydation [8, 14].

Ainsi, après avoir focalisé nos travaux sur la structure cristallographique et électronique des oxydes de métaux de transition, le prochain défi qu'il nous faudra relever concerne le contrôle de ces interactions faibles de type van der Waals (liaisons hydrogène ou autres) entre les ions en solution et la surface du catalyseur (figure 4a) [21]. En effet, ce type d'interactions module grandement les énergies des intermédiaires de la réaction et, comme il a pu être démontré par calcul *ab initio*, permet d'augmenter les performances des catalyseurs jusqu'à, espérons-le, atteindre des surtensions qui s'approcheront toujours plus de zéro. Nul ne doute que pour comprendre des phénomènes aussi complexes, de nombreux outils devront être développés. Parmi ceux-ci, les calculs *ab initio* utilisant la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) seront cruciaux.

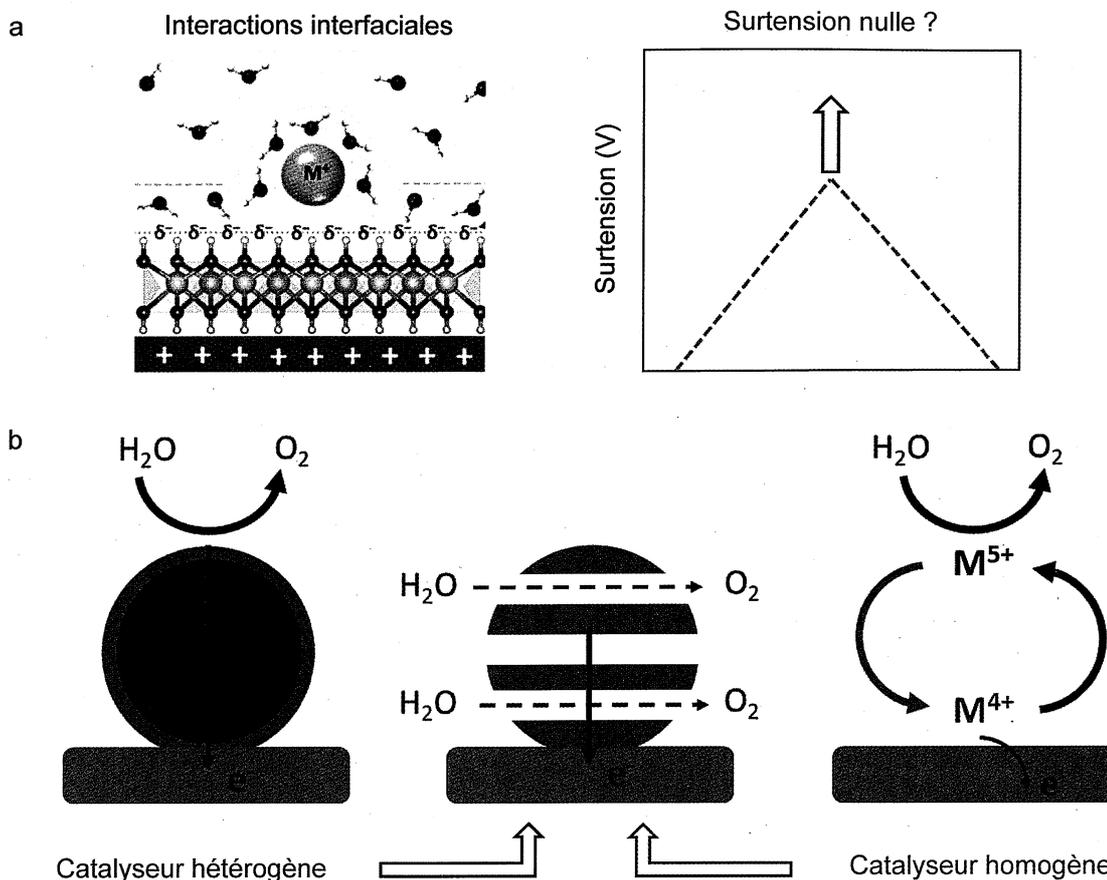


Figure 4 - a) Illustration schématique des interactions interfaciales pouvant avoir lieu entre les ions en solution et la surface des catalyseurs. Le contrôle de ces interactions permettra d'améliorer les performances des oxydes de métaux de transition vis-à-vis de la réaction d'oxydation de l'eau. b) Illustration d'un catalyseur combinant les avantages d'un catalyseur hétérogène, c'est-à-dire d'être solide, et ceux d'un catalyseur homogène, c'est-à-dire d'être en interaction complète avec les ions de la solution. Reproduit d'après [19] avec permission.

Cependant, afin de rendre compte de la complexité des processus aux interfaces électrochimiques, ceux-ci devront inclure le traitement explicite des molécules composant l'électrolyte ainsi que les effets liés au potentiel d'électrode. Sans cela, les informations obtenues resteront superficielles et ne permettront pas de dépasser notre compréhension actuelle. De plus, des outils spectroscopiques *operando* tels que la spectroscopie d'absorption des rayons X (XAS) ou bien de résonance magnétique nucléaire (RMN) permettront certainement d'acquérir de plus amples informations quant aux interactions faibles, et plus spécialement les liaisons hydrogène, qui gouvernent la structure de la double couche en surface des catalyseurs et modulent ainsi les énergies des différents intermédiaires de réaction.

Enfin, le rêve ultime que nous poursuivons actuellement est de combiner les avantages des catalyseurs homogènes (molécules dissoutes en solution), pour lesquels tous les sites actifs sont en contact avec l'électrolyte, avec ceux des catalyseurs hétérogènes (les solides) qui sont plus résistants et plus faciles à intégrer dans un électrolyseur. Pour cela, il s'agira de créer une porosité cristallographique qui sera accessible aux ions présents en solution, permettant d'utiliser la totalité du pouvoir oxydant des catalyseurs, et non plus seulement la surface comme ceci est le cas actuellement pour les oxydes de métaux de transition (figure 4b).

En définitive, notre approche basée sur la chimie des matériaux s'est révélée cruciale pour comprendre les phénomènes d'activation des propriétés électrocatalytiques des oxydes de métaux de transition pour la réaction d'oxydation de l'eau.

Nul doute que les prochains progrès dans ce domaine seront réalisés en intégrant cette connaissance nouvelle avec la compréhension et la prise en compte des interactions complexes ayant lieu en surface des catalyseurs avec les ions présents en solution. Ceci représente donc un défi dont l'importance sera grandissante dans nos futurs travaux. Grâce à une compréhension poussée de ces interactions, nous espérons mieux rationaliser la conception de nouveaux électrocatalyseurs, performants, stables et à base d'éléments abondants et non toxiques, et ainsi accélérer sensiblement l'avènement du stockage chimique à grande échelle de l'électricité renouvelable.

L'auteur remercie l'ANR (projet MIDWAY, ANR-17-CE05-0008) pour le financement.

[1] Evans M.G., Polanyi M.J., Inertia and driving force of chemical reactions, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, **1936**, 32, p. 1333.

[2] Hong W.T., Risch M., Stoerzinger K.A., Grimaud A., Suntivich J., Shao-Horn Y., Toward the rational design of non-precious transition metal oxides for oxygen electrocatalysis, *Energy Environ. Sci.*, **2015**, 8, p. 1404.

[3] Man I.C., Su H.Y., Calle-Vallejo F., Hansen H.A., Martinez J.I., Inoglu N.G., Kitchin J., Jaramillo T.F., Nørskov J.K., Rossmeisl J., Universality in oxygen evolution electrocatalysis on oxide surfaces, *ChemCatChem*, **2011**, 3, p. 1159.

[4] Grimaud A., May K.J., Carlton C.E., Lee Y.-L., Risch M., Zhou J., Shao-Horn Y., Double perovskite as a new family of highly active catalysts for oxygen evolution in alkaline solution, *Nat. Commun.*, **2013**, 4, art. n° 2439.

[5] Hong W.T., Stoerzinger K.A., Lee Y.-L., Giordano L., Grimaud A., Johnson A.M., Hwang J., Crumlin E.J., Yang W., Shao-Horn Y., Charge-transfer-energy-dependent oxygen evolution reaction mechanisms for perovskite oxides, *Energy Environ. Sci.*, **2017**, 10, p. 2190.

[6] Yang C., Grimaud A., Factors controlling the redox activity of oxygen in perovskites: from theory to application for catalytic reactions, *Catalysts*, **2017**, 7, p. 149.

- [7] Grimaud A., Hong W.T., Shao-Horn Y., Tarascon J.-M., Anionic redox processes for electrochemical devices, *Nat. Mater.*, **2016**, *15*, p. 121.
- [8] Grimaud A., Diaz-Morales O., Han B., Hong W.T., Lee Y.-L., Giordano L., Stoerzinger K., Koper M.T.M., Shao-Horn Y., Activating lattice oxygen redox reactions in metal oxides to catalyze oxygen evolution, *Nat. Chem.*, **2017**, *9*, p. 457.
- [9] Mars P., van Krevelen D.W., Oxidations carried out by means of vanadium oxide catalysts, *Chem. Eng. Sci.*, **1954**, *3*, p. 41.
- [10] Grimaud A., Demortière A., Saubanère M., Dachraoui W., Duchamp M., Doublet M.-L., Tarascon J.-M., Activation of surface oxygen sites on an iridium-based model catalyst for the oxygen evolution reaction, *Nat. Energy*, **2017**, *2*, art. n° 16189.
- [11] May K.J., Carlton C.E., Stoerzinger K.A., Risch M., Suntivich J., Lee Y.-L., Grimaud A., Shao-Horn Y., Influence of oxygen evolution during water oxidation on the surface of perovskite oxide catalysts, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2012**, *3*, p. 22.
- [12] Yang C., Batuk M., Jacquet Q., Rousse G., Yin W., Zhang L., Hadermann J., Abakumov A.M., Cibir G., Chadwick A., Tarascon J.-M., Grimaud A., Revealing the pH dependent activities and surface instabilities for Ni-based electrocatalysts during the oxygen evolution reaction, *ACS Energy Lett.*, **2018**, *3*, p. 2884.
- [13] Risch M., Grimaud A., May K.J., Stoerzinger K.A., Chen T.J., Mansour A.N., Shao-Horn Y., Structural changes of cobalt-based perovskites upon water oxidation investigated by EXAFS, *J. Phys. Chem. C*, **2013**, *117*, p. 8628.
- [14] Yang C., Laberty-Robert C., Batuk D., Cibir A., Chadwick A., Pimenta V., Yin W., Zhang L., Tarascon J.-M., Grimaud A., Phosphate ion functionalization of perovskite surfaces for enhanced oxygen evolution reaction, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2017**, *8*, p. 3466.
- [15] Kasian O., Geiger S., Mayrhofer K.J.J., Cherevko S., Electrochemical on-line ICP-MS in electrocatalysis research, *Chem. Rec.*, **2018**, doi: 10.1002/tcr.201800162.
- [16] Zhang R., Dubouis N., Ben Osman M., Yin W., Sougrati M.T., Alves Dalla Corte D., Giaume D., Grimaud A., Dissolution/precipitation equilibrium on the surface of iridium-based perovskites as oxygen evolution reaction catalysts in acidic media, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, doi: 10.1002/anie.201814075.
- [17] Geiger S., Kasian O., Ledendecker M., Pizzutilo E., Mingers A.M., Fu W.T., Diaz-Morales O., Li Z., Oellers T., Fruchter L., Ludwig A., Mayrhofer K.J.J., Koper M.T., Cherevko S., The stability number as a metric for electrocatalyst stability benchmarking, *Nat. Catal.*, **2018**, *1*, p. 508.
- [18] Kim Y.-T., Lopes P.P., Park S.-A., Lee A.-Y., Lim J., Lee H., Back S., Jung Y., Danilovic N., Stamenkovic V., Erlebacher J., Snyder J., Markovic N.M., Balancing activity, stability and conductivity of nanoporous core-shell iridium/iridium oxide oxygen evolution catalysts, *Nat. Commun.*, **2017**, *8*, p. 1449.
- [19] Yang C., Fontaine O., Tarascon J.-M., Grimaud A., Chemical recognition of active oxygen species on the surface of oxygen evolution reaction electrocatalysts, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, *56*, p. 8652.
- [20] Dubouis N., Serva A., Salager E., Deschamps M., Salanne M., Grimaud A., The fate of water at the electrochemical interfaces: electrochemical behavior of free vs. coordinating water, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2018**, *9*, p. 6683.
- [21] Dubouis N., Yang C., Beer R., Ries L., Voiry D., Grimaud A., Interfacial interactions as an electrochemical tool to understand Mo-based catalysts for the hydrogen evolution reaction, *ACS Catal.*, **2018**, *8*, p. 828.

Alexis GRIMAUD,

chargé de recherche au CNRS au laboratoire Chimie du solide et énergie, Collège de France*, et membre du Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie (RS2E)**.

Il a reçu le prix « Espoir de la chimie pour l'énergie » 2018 de l'interdivision Énergie de la Société Chimique de France.

* Chimie du Solide et de l'Énergie, Collège de France, UMR 8260, 75231 Paris Cedex 05.

Courriel : alexis.grimaud@college-de-france.fr

** RS2E, CNRS FR 3459, 80039 Amiens Cedex.

www.energie-rs2e.com/fr