POUR LA SCIENCE
HORS-SÉRIE
FÉVRIER-MARS 2021 - Nº 110

GRAND TÉMOIN
Jean Jouzel

MÉGAFEUX, SÉISMES, CYCLONES, INONDATIONS...

LES COLÈRES DE LA TERRE

POURQUOI SONT-ELLES DE PLUS EN PLUS VIOLENTES ?

SÉISMES
RÉÉVALUER LES RISQUES EN FRANCE

INCENDIES
COMBATTRE LE FEU PAR LE FEU

INONDATIONS
VERS DES PLUIES ET DES CRUES PLUS INTENSES

L 13264 - 110 H - F: 7,90 € - RD
Édition française de Scientific American

LES COLÈRES DE LA TERRE
HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

BEL: 9,40 € - CH: 17,10 CHF – LUX: 8,95 € - CAN: 13,20 $CA

POUR LA SCIENCE - HORS-SÉRIE - FÉVRIER-MARS 2021 - Nº 110

Institut du Cerveau
ICM

BRAINCAST

La voix des neurones

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

Disponible sur **www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/**
ainsi que sur toutes les plateformes de podcast

Braincast est le rendez-vous des amateurs des sciences du cerveau et de leurs derniers développements, qui transforment notre société et expliquent d'une façon nouvelle nos comportements, nos pensées, nos émotions, nos désirs…

Ce podcast emmènera l'auditeur dans une conversation avec un chercheur qui a marqué sa discipline, pour revenir sur sa vie, son parcours, ce qui l'a passionné dans le monde des neurosciences.

Ce moment privilégié, axé sur l'homme ou sur la femme dans leur dimension humaine et sur les fondements de la recherche en neurosciences, va ouvrir pour l'auditeur des fenêtres sur le fonctionnement de son propre cerveau.

Cerveau & Psycho

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

GROUPE POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Réviseuses: Maud Bruguière, Anne-Rozenn Jouble

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Théo Torcq

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Aela Keryhuel

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Cheffe de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétariat général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: William Rowe-Pirra
En couverture:
© Shutterstock.com/VDWimages

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne:
www.boutique.groupepourlascience.fr
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Adresse postale:
Service abonnement
Groupe Pour la Science
56 rue du Rocher
75008 Paris

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)
France métropolitaine: 79 euros – Europe: 95 euros
Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Dean Sanderson
Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Italie
Taux de fibres recyclées: 0%
«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: Ptot 0.008kg/tonne
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org

LOÏC MANGIN
Rédacteur en chef adjoint

Admirer ou mépriser ?

«Le fléau n'est pas à la mesure de l'homme, on se dit donc que le fléau est irréel, c'est un mauvais rêve qui va passer.» Le fléau en question est la peste, dans le roman éponyme d'Albert Camus paru en 1947. Aujourd'hui, l'humanité est face à une autre immensité dont on aimerait bien qu'elle soit imaginaire: le réchauffement climatique. Mais il n'en est rien et Petteri Taalas, secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale, l'a rappelé dans un rapport publié en décembre 2020: «La température moyenne mondiale en 2020 devrait être supérieure d'environ 1,2 °C à sa valeur préindustrielle (période 1850-1900).» En d'autres termes, 2020 est l'une des années les plus chaudes jamais enregistrées.

Cette augmentation «moyenne» se traduit souvent par une intensification des «extrêmes», ceux d'épisodes météorologiques qui prennent souvent l'apparence de fléaux: inondations, crues, tempêtes, cyclones, sécheresses, incendies... Pour la plupart, ces phénomènes affectant des millions de personnes dans le monde sont de plus en plus violents. Et ils le seront encore davantage si l'on ne fait rien pour inverser la tendance. En prend-on le chemin? Cinq ans après l'accord de Paris sur le climat, et à la veille d'un projet de loi issu des propositions de la Convention citoyenne sur le climat, on peut sinon en douter du moins supposer que les efforts sont encore insuffisants.

Pourtant, toujours dans *La Peste*: «La situation était grave, mais qu'est-ce que cela prouvait? Cela prouvait qu'il fallait des mesures encore plus exceptionnelles.» Contre les colères de la Terre, de telles solutions existent, et outre l'indispensable baisse des émissions de gaz à effet de serre, on peut résumer ainsi celles décrites dans ce *Hors-Série*: comprendre, prévenir, s'adapter... Elles sont aussi pertinentes contre les fléaux indépendants du réchauffement climatique, comme les séismes et les éruptions volcaniques.

Rien n'est encore inéluctable, tout est affaire de volonté, à tous les niveaux de la société, et peut-être, alors, comme dans le roman de Camus, verra-t-on qu'«au milieu des fléaux, [...] il y a dans les hommes plus de choses à admirer que de choses à mépriser.» ■

SOMMAIRE

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE

N° 110
Février-mars 2021

Les colères DE LA TERRE

À L'ÉCOUTE DES FUREURS TELLURIQUES

Constituez votre collection de *Hors-Séries Pour la science*
Tous les numéros depuis 1996

pourlascience.fr

P. 6
Repères
Chiffres, cartes, schémas… l'indispensable pour apprécier ce numéro.

P. 8
Avant-propos
JEAN JOUZEL
« L'exposition aux événements extrêmes est un mécanisme de création d'inégalités »

P. 14
Un risque sismique sous-estimé ?
Jean-François Ritz, Matthieu Ferry, Christophe Larroque, Stéphane Baize et Laurence Audin
Le séisme du Teil, en 2019, oblige à réévaluer le risque sismique en France métropolitaine.

P. 20 Entretien
« Mayotte a tremblé sous le coup de la plus grande éruption sous-marine jamais documentée »
Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand

P. 26 Portfolio
Éphémères deltas de lave
Michel Detay et Pierre Thomas
Comment naît et meurt un delta de lave? Réponse en images.

P. 34
Tsunamis : les leçons du passé
François Schindelé et Hélène Hébert
Les catastrophes de 2004 et de 2011 ont révélé les lacunes des systèmes d'alerte.

À L'HEURE DE L'ANTHROPOCÈNE

P. 44
Le jet-stream, amplificateur météorologique
Michael E. Mann
Le courant de vents forts à haute altitude est parfois responsable d'événements extrêmes.

P. 52
Dans un tourbillon d'air et de feu
Jason Forthofer
Les chercheurs comprennent de mieux en mieux la physique des tornades de feu.

P. 60
Au cœur des ténèbres enfumées
Kyle Dickman
Comment les fumées des incendies de forêt affectent-elles la santé humaine ?

P. 68
Des cyclones plus destructeurs ?
Emmanuel Dormy et Ludivine Oruba
La fréquence et la violence des cyclones semblent augmenter.

P. 78
Que d'eau, que d'eau !
Cécile Caillaud, Olivier Payrastre, Yves Tramblay et Freddy Vinet
Les épisodes de pluies extrêmes et les crues qui en découlent vont probablement s'intensifier !

SE RÉCONCILIER AVEC LA NATURE ?

P. 88
Combattre le feu par le feu
Jane Braxton Little
Pour lutter contre les incendies, une solution consiste à déclencher des feux préventifs.

P. 92
La nature plus forte que le béton
Rowan Jacobsen
Contre les tempêtes, des dispositifs naturels protègent mieux que les structures artificielles.

P. 98
Bienvenue dans les villes éponges
Erica Gies
Accompagner les cycles naturels de l'eau pour lutter contre les inondations et les sécheresses.

P. 104
De la responsabilité des scientifiques face à l'aléa
Léo Coutellec
Lorsque des scientifiques se trompent dans leurs prévisions, qui est responsable ?

P. 108
À lire en plus

RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 110
Rebondissements
Guérilla au fond des follicules • Ça tourne au ralenti • Une conscience mieux mesurée • L'horloge de Schrödinger •

P. 114
Données à voir
Faites ce que je dis, pas ce que je fais

P. 116
Les incontournables
Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

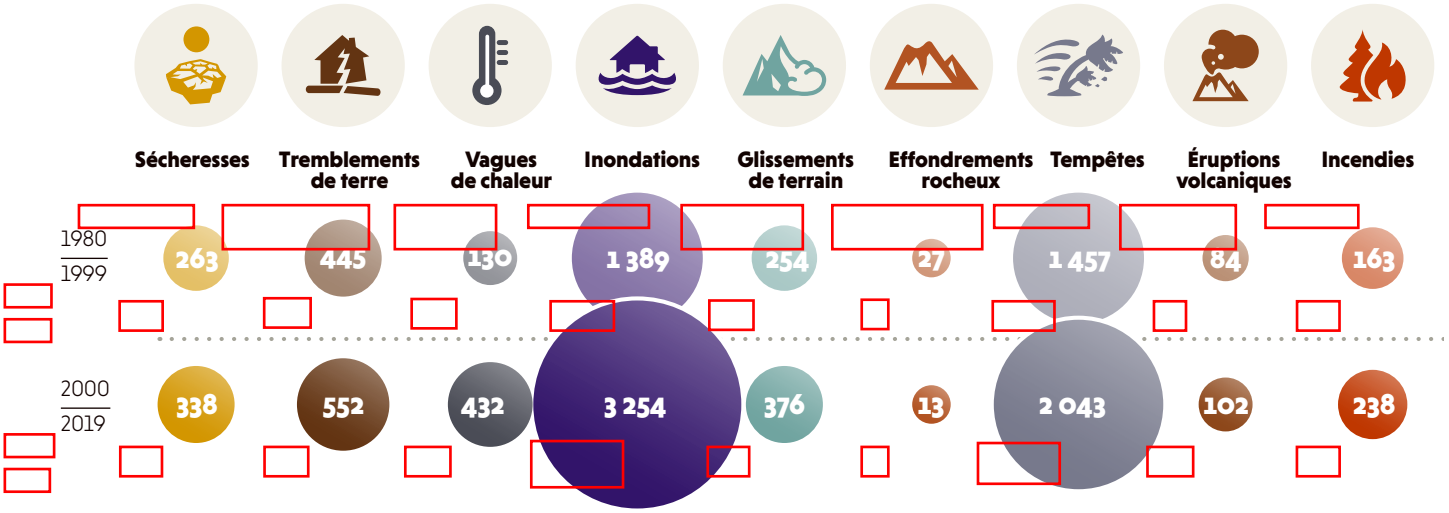
P. 118
Spécimen
Un poisson-globe trotter

P. 120
Art & Science
Les pensées du singe

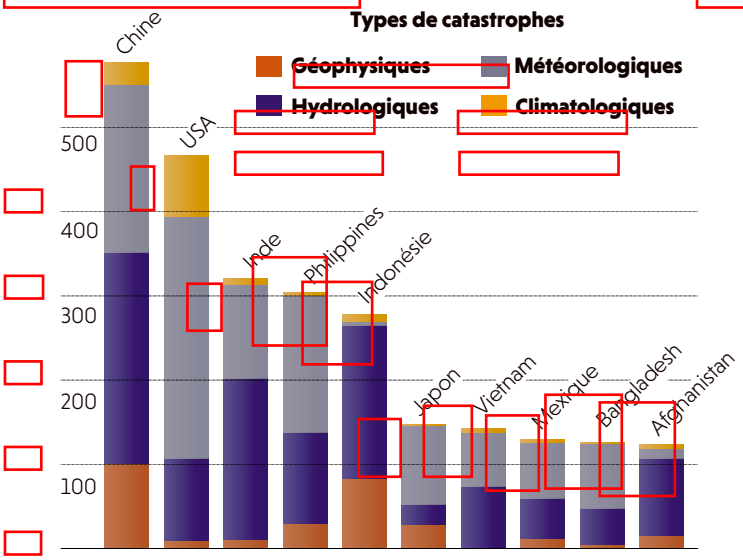
Un monde en péril

Les catastrophes naturelles font chaque année des dizaines de milliers de morts, des centaines de milliers de blessés et des milliards d'euros de dégâts. Dans un rapport publié le 13 octobre 2020, le bureau des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNDRR) montre que le changement climatique est le principal responsable du doublement des catastrophes naturelles dans le monde ces vingt dernières années.

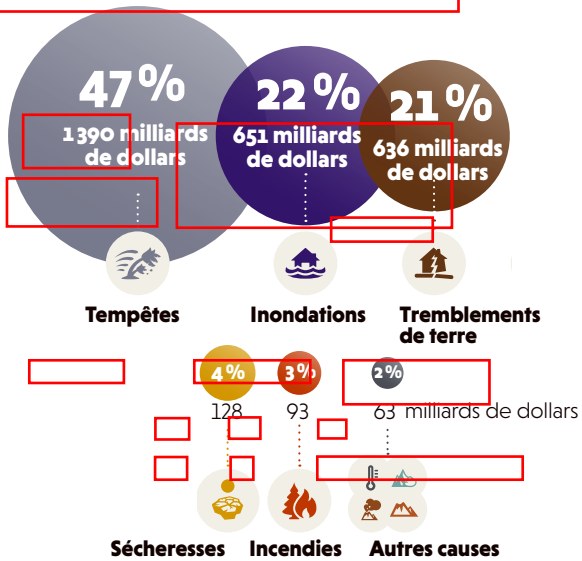
Les inondations et les tempêtes sont de loin les événements extrêmes les plus fréquents



Le top 10 des pays les plus touchés

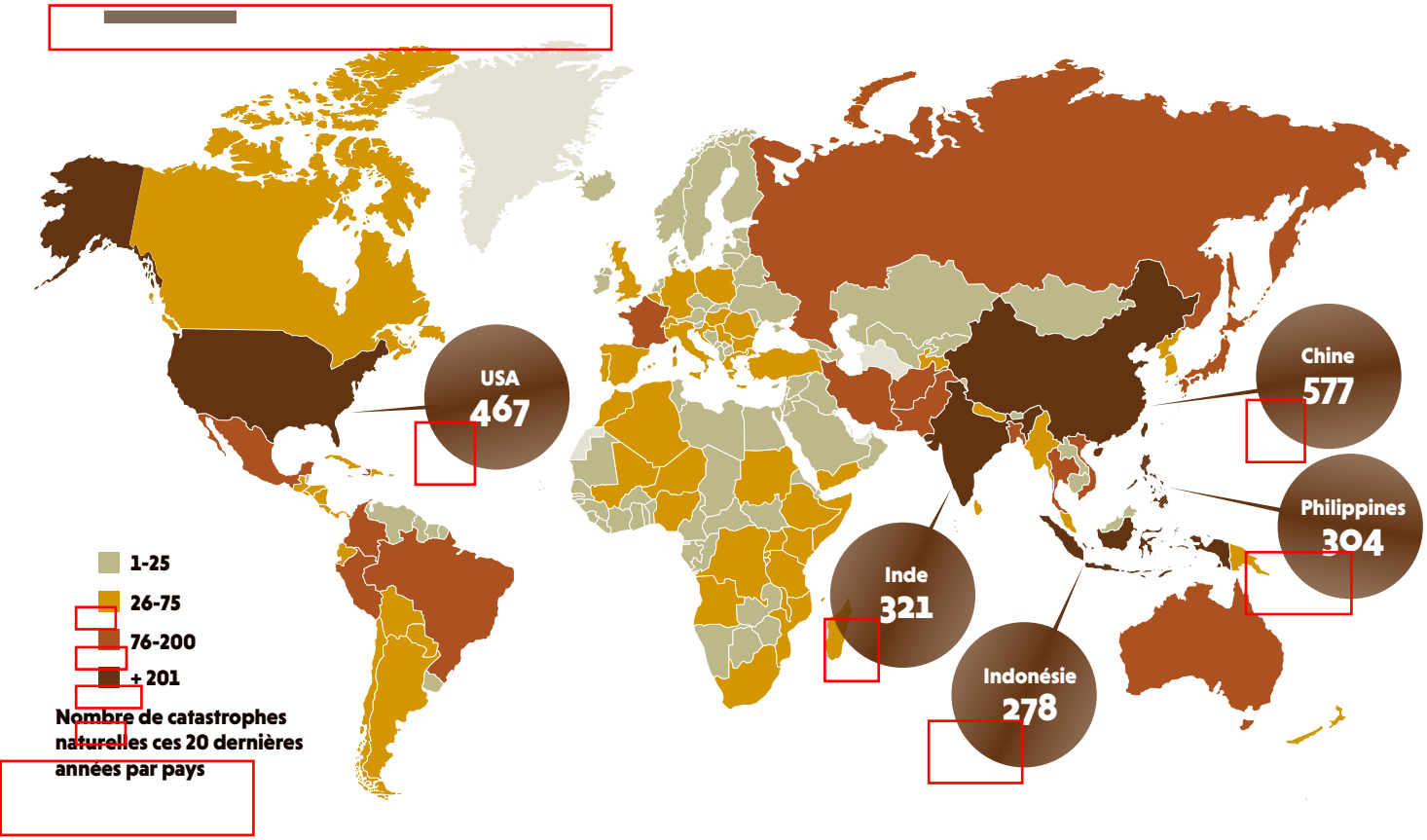


Les dégâts s'élèvent au total à 2961 milliards de dollars



© UNDRR

Aucune région n'est épargnée



Le top 10 des événements les plus mortels du XXIe siècle

Tremblements de terre et tsunamis	Océan Indien	2004	226 408
Tremblements de terre	Haïti	2010	222 570
Tempêtes	Myanmar	2008	138 366
Tremblements de terre	Chine	2008	87 476
Tremblements de terre	Pakistan	2005	73 338
Vagues de chaleur	Europe	2003	72 210
Vagues de chaleur	Russie	2010	55 736
Tremblements de terre	Iran	2003	26 716
Tremblements de terre	Inde	2001	20 005
Sécheresses	Somalie	2010	20 000

JEAN JOUZEL

« L'exposition aux événements extrêmes est un mécanisme de création d'inégalités face au réchauffement climatique »

Saison cyclonique record, inondations et crues dévastatrices, sécheresse prolongée, mégafeux en Amazonie, en Californie, en Australie… Qu'est-ce que cette succession d'événements extrêmes ayant marqué l'actualité de ces derniers mois vous inspire ?

Jean Jouzel : Hélas, pour la plupart de ces phénomènes, la tendance observée est conforme aux prévisions du troisième rapport du Giec (le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat dont j'ai été vice-président du groupe scientifique de 2002 à 2015). Dès cette époque, en 2001, les experts s'attendaient à une intensification des événements extrêmes.

Plus généralement, le climat actuel et son évolution sont ceux que les modélisateurs avaient anticipés il y a trente ans à partir de scénarios d'émission de gaz à effet de serre : une augmentation moyenne des températures proche de deux dixièmes de degré par décennie, l'amplification du réchauffement dans les régions polaires, l'accélération de l'élévation du niveau des mers…

BIO EXPRESS

5 MARS 1947
Naissance à Janzé (Ille-et-Vilaine).

2001 À 2008
Directeur de l'institut Pierre-Simon-Laplace.

2002
Médaille d'or du CNRS.

2002 À 2015
Vice-président du groupe scientifique du Giec.

DEPUIS 2009
Président de Météo et Climat (ancienne Société météorologique de France).

Dans l'évolution observée des événements extrêmes, quelle part est directement imputable au réchauffement climatique ?

Jean Jouzel : Les vagues de chaleur sont les plus indiscutables. Quand j'ai commencé à étudier le climat dans les années 1980, une température de 40 °C en France apparaissait presque comme une limite. Et on a dépassé 45 °C ponctuellement durant l'été 2019, avec un record à 45,9 °C dans le Gard ! Des travaux ont montré que la hauteur des pics de chaleur augmenterait deux à trois fois plus rapidement que les températures moyennes, or celle de la France croît de 0,3 °C par décennie. Et selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), 2020 devrait se classer parmi les trois années les plus chaudes jamais constatées, avec 2016 et 2019.

C'est un vrai problème, car chaque année, les événements extrêmes font en moyenne 3000 victimes en Europe. Souvenons-nous de la canicule de 2003 et ses 75000 décès (20000 en France). Selon les prévisions, ce nombre pourrait être multiplié par 30 ou 40 d'ici à la fin du siècle dans certaines régions et 99% seront liées aux vagues de chaleur dans les villes.

L'élévation du niveau des mers est aussi indubitablement liée aux activités humaines. Pour d'autres phénomènes, comme les cyclones, l'intensification anticipée – qui est déjà une réalité – a aussi des causes anthropiques.

Le cas des inondations est quant à lui beaucoup discuté, mais un consensus se dégage sur une augmentation du nombre d'épisodes méditerranéens. Et on comprend bien le mécanisme: une mer plus chaude libère plus de vapeur d'eau qui retombera ensuite sous forme de précipitations. L'inondation dans le sud de l'Île-de-France, en juin 2016, a surpris. Et, depuis, des simulations ont suggéré que la fréquence de ces événements pourrait augmenter.

Qu'en est-il des sécheresses ?

Jean Jouzel : L'attribution est moins facile pour le moment. Dans le nord et l'est de la France, quatre étés secs se sont bien succédé, et des rivières ont pour la première fois depuis longtemps été asséchées. Mais les séries historiques montrent que de tels épisodes se sont déjà produits par le passé. Il en est de même pour les grandes tempêtes extratropicales dans nos régions, comme celle de 1999, qui détruisent nos forêts. Il y en a eu aussi XVIIIe siècle. Dans les deux cas, la prudence s'impose pour déceler la trace du réchauffement climatique.

Quoi qu'il en soit, la conséquence d'une sécheresse plus marquée et des pics de chaleur plus fréquents est la multiplication des mégafeux, par exemple en Californie, en Amazonie, en Australie... La France est un cas à part, car dans notre pays seuls 10% des incendies sont d'origine naturelle, l'essentiel étant des feux criminels, et leur prévention s'est améliorée.

On oublie souvent que les sécheresses ne résultent pas seulement d'un manque de précipitations. L'évaporation est aussi un facteur central, et avec un réchauffement d'un degré de plus, la loi de Clausius-Clapeyron nous dit qu'elle augmente de quelques points de pourcentage. Je suis toujours impressionné par ces cartes du projet *Explore* montrant qu'à l'horizon 2050 les débits des fleuves et des rivières diminueront de 10 à 40%, voire plus en été. C'est le cas même dans les régions comme le Nord de la France et le bassin Seine-Normandie, où l'on ne prévoit pourtant pas beaucoup de modifications des précipitations en moyenne annuelle.

Mais la sécheresse n'empêche pas les inondations, car on parle ici de moyenne des précipitations sur l'année. Ainsi, avec le réchauffement, dans les régions sous influence de l'Atlantique, les hivers sont plus doux et généralement plus arrosés par des masses d'air venant de l'océan. Les risques d'inondations augmentent dans les villes comme Morlaix, Redon, Messac... en Bretagne, mais surtout en Angleterre. Ces dernières années, la Tamise a souvent débordé. Et cela ne va pas s'arranger avec l'élévation du niveau de la mer, qui ralentira le flux des eaux des bassins-versants vers celle-ci.

Chaque pays et chaque région ont leurs propres fragilités qui sont autant de sources de tension. Avec globalement moins d'eau, même si les réserves souterraines restent disponibles, des arbitrages seront nécessaires dans certaines régions, par exemple entre irrigation et tourisme.

Face à ces sombres perspectives, nous avons deux façons de réagir : empêcher le pire d'advenir, c'est l'atténuation, ou s'adapter. Sont-elles complémentaires ?

Jean Jouzel : C'est une question d'échelle de temps. Le réchauffement est inéluctable jusqu'en 2040-2050, quoi que l'on émette dans l'atmosphère au cours des dix prochaines années. Donc, l'adaptation est indispensable, et c'est l'idée de l'accord de Paris sur le climat, signé en 2015: limiter le réchauffement climatique de façon que l'adaptation reste possible pour l'essentiel, notamment pour des pays plus vulnérables que la France. Mais dans notre pays, nous n'échapperons pas à au moins 1 °C supplémentaire, dans le meilleur des cas. Au-delà, si on ne fait rien pour lutter contre, le réchauffement atteindra 4≈à 5 °C et là, l'adaptation sera vraiment problématique. Auparavant, je mettais l'accent sur l'atténuation avec l'idée qu'à trop parler d'adaptation, le public peut penser qu'il n'y a rien à faire ou que ce serait inutile. Aujourd'hui, je suis convaincu qu'il faut mener les deux de pair, c'est clair.

D'ici à 2100, le nombre de victimes liées aux événements climatiques pourrait être multiplié par 30 ou 40 dans certaines régions

Dans beaucoup d'endroits, l'adaptation passe par des solutions fondées sur la nature, par exemple la restauration de récifs huîtriers pour en faire des brise-lames. Qu'en pensez-vous ?

Jean Jouzel : Il y a beaucoup à faire de ce côté-là, par exemple en réinstaurant des mangroves dans certaines régions. En fait, c'est un peu le retour du bon sens. Mais ces dispositifs naturels ne seront pas suffisants pour contrer une élévation de 1 mètre du niveau de la mer et ne dispenseront pas de fabriquer des digues. Et ces dernières ont aussi leurs limites. Certains spécialistes réfléchissent à rendre des terres à la mer. Et au Pays-Bas, une réflexion est menée autour de l'idée d'habitats quasi aquatiques qui accepteraient une submersion temporaire.

Un article récent indiquait qu'en France, après 2050, jusqu'à un million d'habitants des régions côtières seront exposés au risque de submersions. Et c'est selon moi un cas d'inégalité face au réchauffement climatique, car une maison inondée, >

même « seulement » huit jours tous les trois ans, n'a plus de valeur. Sans moyen pour aller ailleurs, vous êtes coincés.

J'ai ce même sentiment en regardant ces vallées du Gard ou de l'Aude (c'est peut-être un peu différent dans l'arrière-pays niçois où les inondations sont plus exceptionnelles) inondées par des événements méditerranéens. Sur les images, on sent bien que les victimes sont piégées à vie, sans solution pour quitter cet endroit. Ce mécanisme de création d'inégalités pose question quand on pense adaptation.

Précisons tout de même, car on n'en parle pas beaucoup, que la France est dotée d'un plan national visant une adaptation effective dès le milieu du XXIe siècle à un climat régional en métropole et dans les outre-mer cohérent avec une hausse de température de 1,5 à 2 °C au niveau mondial. La région est la bonne échelle, car les problèmes sont différents selon que vous êtes sur les côtes charentaises ou bien sur les stations de moyenne montagne. Et à un niveau inférieur, le plan climat-air-énergie territorial que chaque intercommunalité regroupant plus de 20 000 habitants doit mettre en place, prévoit un volet atténuation (et un autre dédié à l'adaptation).

Nous parlons d'une situation qui va empirer, mais dans certaines régions du monde, le paroxysme est déjà là. Par exemple, rien que pour l'année 2019, 23 millions de personnes se sont déplacées, chassées par des inondations ou des ouragans.

Jean Jouzel : Oui, en mars 2019, les énormes inondations au Mozambique m'ont marqué. Une ville entière, Beira, qui comptait 500 000 habitants, a été détruite par les eaux apportées par le cyclone Idai. On déplore plus de 700 victimes. Trois raisons climatiques obligent les gens à quitter l'endroit où ils vivent : l'élévation du niveau de la mer, les inondations et les sécheresses empêchant la sécurité alimentaire d'être assurée. Mais, le plus souvent, on a envie de rester où l'on est tant que l'on peut y vivre normalement.

La recrudescence d'événements extrêmes met davantage de populations sur les routes, même si parfois une partie revient à l'endroit qu'elle a quitté. Nous en avions discuté au Giec, avec prudence cependant parce que la migration est aussi d'une certaine façon une technique d'adaptation, mais elle est quand même brutale.

Pour ce qui est de l'atténuation, on sait en grande partie sur quels leviers il faudrait agir (isolation thermique, mobilité…). Pourtant la mise en œuvre tarde. Pourquoi ?

Jean Jouzel : Nous en avons un exemple sous les yeux avec la Conférence citoyenne pour le climat. Je suis dans le comité de gouvernance, et je me suis par exemple intéressé à l'évaluation des mesures proposées sur les émissions de gaz à effet de serre. À quoi ressemblera la loi chargée de reprendre les 146 propositions (sur les 150 initiales, quatre ont été retoquées : une par les citoyens, trois par le président de la République) et dont on nous annoncera les contours d'ici à fin janvier ? On voit déjà que certaines sont déjà rabotées. Un seul exemple. Un malus devait concerner les véhicules de plus de 1,4 tonne, et ce sera 1,8 tonne : la part du parc automobile concernée est divisée par 10, sinon plus !

Les cartes du projet Explore montrent qu'à l'horizon 2050 les débits des fleuves et des rivières français diminueront de 10 à 40 %, voire plus

Je crains qu'au final, cette loi n'atteigne pas son objectif, à savoir mettre la France sur une trajectoire conduisant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % d'ici à 2030 par rapport à 1990. Je pense qu'il faudrait adopter toutes les mesures des citoyens sans les dévoyer. On est loin du compte. La volonté politique manque.

N'y a-t-il pas des lueurs d'espoir qui aideraient à garder un peu d'optimisme ?

Jean Jouzel : Quelques-unes peut-être. Citons ce pacte finance-climat que nous avons lancé avec Pierre Larrouturou en 2015 : l'idée est d'élaborer des solutions concrètes pour financer la transition écologique et solidaire en Europe. Après cinq ans, on a compris que la transition énergétique est techniquement possible. Les enjeux sont énormes. Par exemple, en France, selon l'Ademe, il y aurait entre 600 000 et 900 000 emplois nets créés d'ici à 2050.

Lors de la crise du Covid-19, le gouvernement a mobilisé énormément d'argent à côté duquel les investissements nécessaires pour réussir la transition énergétique sont minimes. Là aussi, un peu de volontarisme serait le bienvenu.

Paradoxalement, une bonne nouvelle est venue de Chine, un des pays les plus émetteurs de gaz à effet de serre. Xi Jinping a annoncé la neutralité carbone d'ici à 2060. On est tenté de le prendre au sérieux, car il doit tenir compte des jeunes chinois qui ne peuvent plus respirer en ville et surtout de la grande fragilité du pays face au changement climatique. En effet, le pays est menacé dans les régions côtières et dans l'Himalaya. Par ailleurs, la Chine a compris que le développement économique passe désormais par la transition écologique.

Joe Biden, nouveau président des États-Unis a lui aussi annoncé la neutralité carbone de son pays d'ici à 2050.

Alors, finalement, peut-être que les choses bougent. J'aimerais tellement qu'on y arrive, parce que c'est un problème très sérieux, un peu pour ma génération, mais beaucoup pour les suivantes. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement Pour La Science - 56 rue du Rocher - 75008 Paris - serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG21STDDOS

☑ **OUI, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

PAG79E

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

PAG99E

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque** à l'ordre de Pour la Science

☐ **Carte bancaire**

N° ....

Date d'expiration ..... Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

L'éruption de l'Eyjafjallajökull, en Islande.

©Shutterstock.com/Olivier A. A. Vandeginste

À L'ÉCOUTE DES FUREURS TELLURIQUES

Éruptions volcaniques, séismes parfois suivis de tsunamis... la Terre tremble souvent, même en France métropolitaine. Les dégâts humains et matériels sont quelquefois considérables, comme en décembre 2004 lorsqu'une gigantesque rupture de faille a endeuillé tout le pourtour de l'océan Indien avec des vagues géantes aussi rapides que des avions. Pour éviter qu'à l'avenir les mêmes causes (qui se reproduiront) aient les mêmes effets dramatiques, les géophysiciens ne ménagent pas leurs efforts pour comprendre les ressorts de ces phénomènes. Leur objectif ? Détecter précocement le moindre soubresaut de la Terre, possible signe avant-coureur d'une catastrophe, afin de l'éviter en alertant les populations exposées.

LES AUTEURS

JEAN-FRANÇOIS RITZ
est directeur de recherche au CNRS et membre du laboratoire Géosciences Montpellier, à l'université de Montpellier.

MATTHIEU FERRY
est maître de conférences et membre du laboratoire Géosciences Montpellier.

CHRISTOPHE LARROQUE
est maître de conférences à l'université de Reims et membre du laboratoire Géoazur, à l'université de la côte d'Azur.

STÉPHANE BAIZE
est chercheur-géologue à l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), à Fontenay-aux-Roses.

LAURENCE AUDIN
est directrice de recherches à l'IRD et membre de l'Institut des sciences de la Terre (ISTerre), à l'université de Grenoble-Alpes.

Un risque sismique sous-estimé ?

La sismicité de la région du Teil, dans la vallée du Rhône, était supposée modérée. Pourtant le séisme de 2019 a causé de gros dégâts et une rupture en surface inédite. L'élucidation des mécanismes à l'œuvre oblige à réévaluer le risque sismique en France métropolitaine même dans les zones réputées stables.

L'ESSENTIEL

- La terre a tremblé au Teil, en Ardèche, en novembre 2019 alors que la région était classée dans une zone à sismicité modérée.
- Les experts dépêchés sur place ont analysé les effets de ce séisme inédit par ses caractéristiques.
- Le mouvement des blocs de croûte terrestre en cause est inversé par rapport à ceux qui ont eu lieu par le passé.
- Des travaux sont en cours pour mieux caractériser les risques de rupture sismique dans des zones que l'on imaginait épargnées.

Le 11 novembre 2019, un violent séisme de magnitude 5,4 sur l'échelle de Richter a secoué le sud de la France, fait trembler l'Ardèche et frémir Marseille comme Montpellier, faisant quatre blessés. L'épicentre, situé près de la ville du Teil, dans la vallée du Rhône, correspond à une zone densément peuplée avec de nombreuses installations industrielles dont deux centrales nucléaires situées à moins de 25 kilomètres. Le tremblement de terre a causé des dégâts importants dans les villages du Teil, de Saint-Thomé et de Viviers, fissurant des murs épais et provoquant la chute de tuiles, de cheminées et de cadres de fenêtres et provoquant l'effondrement partiel de nombreuses maisons. Au total, dans le seul village du Teil, plus de 700 bâtiments ont été endommagés ou éventrés: des sinistres chiffrés à plusieurs dizaines de millions d'euros. Le séisme «du Teil» est le plus destructeur et le plus fort ressenti en France depuis celui d'Arette, dans les Pyrénées, en 1967. Et il a eu lieu là où on n'imaginait pas qu'il puisse se produire!

ANATOMIE D'UN SÉISME

Avant cet événement, dans la vallée du Rhône, le niveau de sismicité détectée par des instruments, sans même qu'elle soit ressentie par les populations, était faible à modérée, et peu de fortes secousses telluriques avaient été documentées ces derniers siècles. Que s'est-il passé? Doit-on s'inquiéter de nouveaux séismes à venir? Sous-estime-t-on le risque de tremblements de terre en France métropolitaine? Pour répondre, plongeons dans les profondeurs du sous-sol. >

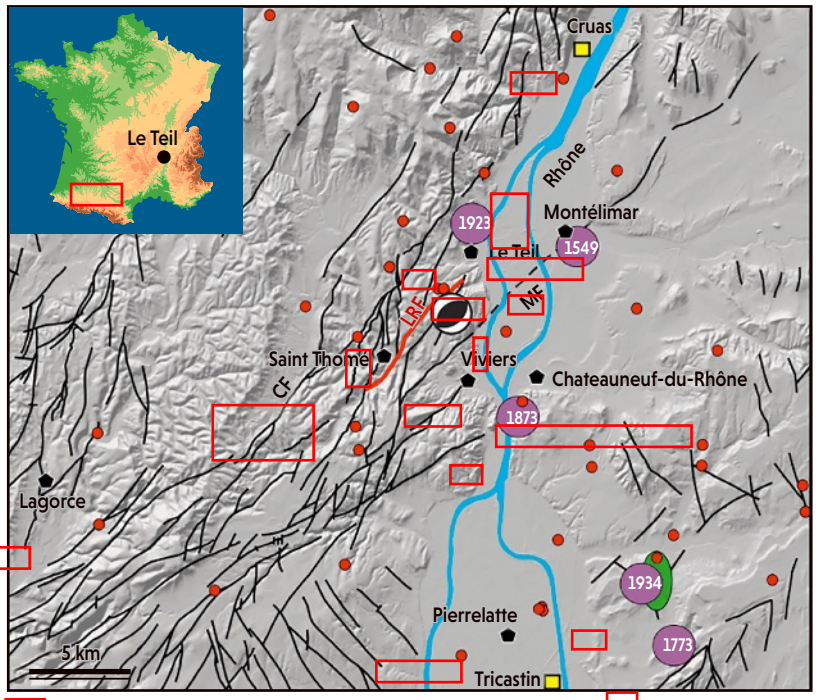
©Shutterstock.com/Varavin88

Dans les jours qui ont suivi le tremblement de terre, des calculs plus précis ont montré qu'il était très superficiel avec un foyer (ou hypocentre) situé entre 1 et 3 kilomètres de profondeur. Au regard de sa force, une si faible profondeur suggérait que la rupture sismique s'était probablement propagée jusqu'à la surface. Ces caractéristiques et la présence d'une importante carrière de calcaire à ciel ouvert située près de l'épicentre (le point en surface à l'aplomb du foyer) ont immédiatement questionné sur l'origine du séisme du Teil: pouvait-il avoir, au moins en partie, une origine anthropique? L'Institut des sciences de l'Univers (Insu) du CNRS a mandaté un groupe d'experts pour étudier la question. Leur rapport publié en ligne quarante jours après l'événement, a conclu que le déficit de masse dû à l'extraction de matériaux de la carrière a pu contribuer au déclenchement du séisme. Cependant, les experts soulignèrent également que l'origine et la taille de la secousse sismique étaient essentiellement dues à l'accumulation de forces tectoniques au fil du temps.

L'épicentre du séisme est situé au nord-est du système de failles des Cévennes, à proximité immédiate de l'une d'elles, la faille de La Rouvière. Celle-ci court sur environ 10 kilomètres entre les villages de Saint-Thomé, au sud-ouest, et du Teil, au nord-est (*voir la figure ci-contre*). Le système de failles des Cévennes correspond à une limite structurale majeure entre le socle cristallin du Massif central et le bassin sédimentaire du sud-est de la France, qui borde la chaîne des Alpes. La structure actuelle de cette région résulte d'une évolution en plusieurs étapes ayant abouti à un canevas structural composé de failles orientées nord-est sud-ouest sur plus de 100 kilomètres de longueur et plongeant vers l'est.

À quel point le séisme du Teil est-il inhabituel? Du point de vue de la sismicité dite «instrumentale», le Réseau national de surveillance sismique (RéNaSS) et le Laboratoire de détection et de géophysique (LDG) du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) ont enregistré 39 secousses entre 1962 et 2018 dans un rayon de 20 kilomètres autour du village du Teil, toutes de «magnitude du moment» M_w (*voir l'encadré page ci-contre*) inférieure à 2,9 et donc le plus souvent non ressentis. Cette magnitude du moment, privilégiée par les sismologues, rend compte de l'énergie émise par le tremblement de terre alors que celle de Richter, fondée sur des mesures locales de sismomètres, est moins précise. Les profondeurs de ces événements sont estimées entre 5 et 24 kilomètres. La distribution des épicentres ne montre aucun schéma particulier qui trahirait l'activité d'une faille donnée.

Historiquement, quelques crises sismiques plus violentes ont été répertoriées au sud du Teil en 1773, en 1873 et en 1934. Le principal événement historique régional s'est produit le 19 juillet 1873, près de Châteauneuf-du-Rhône. Son intensité a atteint VII sur l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), une gradation sur 12 degrés des dégâts causés par un tremblement de terre: le niveau VII correspond à des dommages prononcés, avec de larges lézardes dans les édifices et la chute de cheminées. On a estimé sa magnitude M_w autour de 4 et la profondeur de son foyer à environ 3 kilomètres. À noter qu'un séisme a été localisé au Teil, le 26 novembre 1923, avec une intensité MSK de IV (on ressent des vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion), pour une magnitude M_w estimée à 3.

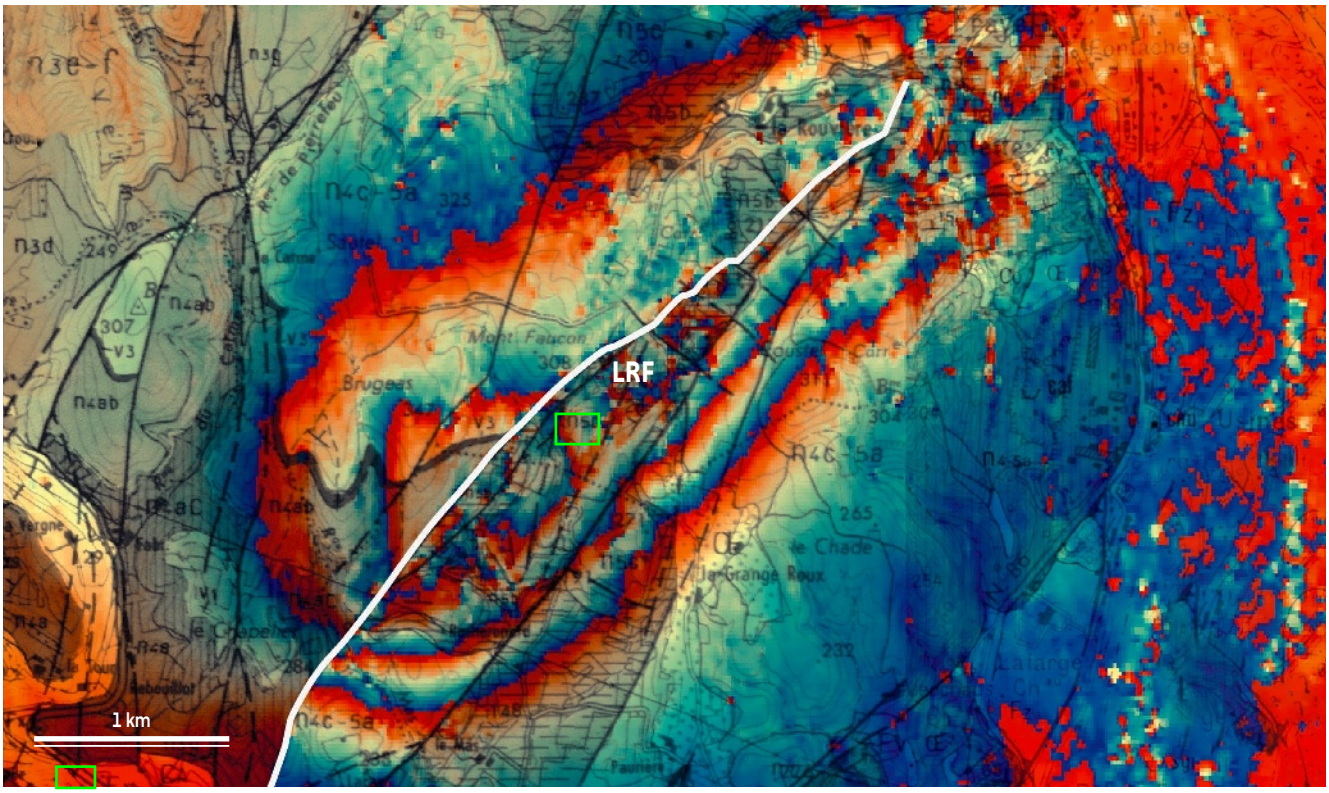


La carte sismotectonique de la vallée du Rhône, entre Massif Central et Alpes, où s'est produit le séisme du 11 novembre 2019 *(le rond noir et blanc)*. Les points rouges indiquent des séismes mineurs (de magnitude inférieure à 2,9) non ressentis, mais détectés par des instruments. Les points violets correspondent aux séismes historiques. Les lignes noires indiquent les failles géologiques cartographiées avec notamment la faille de la Rouvière *(LRF, en rouge)*, la faille des Cévennes *(CF)*, la faille de Marsanne *(MF)*. On distingue également les centrales nucléaires *(carrés jaunes)*.

ET LA TERRE S'EST SOULEVÉE

À partir de l'analyse des ondes sismiques détectées par quatre stations les plus proches, le séisme du Teil a pu être localisé à 500 mètres près. Ces ondes sont celles de compression (notées P, elles correspondent à des déplacements du sol parallèles à la direction de propagation de l'onde) et celles de cisaillement (notées S, cette fois, les mouvements du sol sont perpendiculaires au sens de propagation de l'onde). Le foyer du tremblement de terre a été estimé à un kilomètre de profondeur, et son mécanisme – la géométrie précise de la rupture ainsi que son sens de mouvement – montre qu'il s'agit d'un plan de faille avec un glissement purement inverse, c'est-à-dire que le bloc du dessus glisse vers le haut par rapport au bloc du dessous qu'il chevauche.

La déformation de surface associée au séisme du Teil a été mesurée grâce aux données du satellite *Sentinel-1* fournies par le programme *Copernicus* de la Commission européenne. La comparaison (on parle d'interférogramme)



L'interférogramme obtenu à l'aide des données du satellite *Sentinel-1* compare une image pré-séisme à une autre post-séisme. Les lignes noires correspondent à des failles, et la ligne blanche définit la section nord de la faille de La Rouvière *(LRF)*. Les franges d'interférence apparaissent là où un mouvement vertical a été détecté par le satellite à raison d'une frange *(du bleu au rouge)* par déplacement de trois centimètres. Ainsi, le bloc sud-est s'est soulevé d'environ 12 centimètres *(4 franges)* et le bloc nord-ouest s'est affaissé de 6 centimètres *(2 franges dans l'autre sens)*.

© D'après J.-F. Ritz et al., 2020

entre une image présismique datant du 31 octobre et une autre postsismique datant du 12 novembre (*voir la figure ci-dessus*) a confirmé l'existence d'une rupture sismique très proche de la surface sur une longueur d'environ 5 kilomètres, orientée nord-est sud-ouest, correspondant à la moitié nord de la faille de La Rouvière. Cet interférogramme a également révélé que le bloc situé au sud-est s'était soulevé par rapport au bloc situé au nord-ouest, avec un décalage vertical compris entre 10 et 15 centimètres.

En utilisant des images satellites prises à 6 jours d'intervalle, plutôt que 12, les sismologues ont calculé un interférogramme plus précis, à partir duquel la composante verticale du déplacement a été déterminée plus précisément. De la sorte, ils ont repéré les gradients de déplacement les plus forts, interprétés comme étant associés à une rupture du sol. Le plus fort gradient de déplacement vertical est bien localisé le long de la faille de La Rouvière. Ils ont alors construit un >

UNE AFFAIRE DE MAGNITUDE

La magnitude quantifie l'énergie libérée lors d'un séisme, c'est-à-dire lors d'un glissement soudain le long d'un plan de faille, sous forme d'ondes sismiques qui radient au-delà de la zone de glissement. Facile à définir, le paramètre est néanmoins difficile à déterminer, car il est inaccessible à une mesure directe. On le calcule à partir des signaux enregistrés par les stations sismologiques.

La magnitude dite « de Richter » ou magnitude locale M_L est calculée en fonction de l'amplitude maximale d'une partie des ondes mesurées sur un sismomètre et de la distance de ce sismomètre à l'épicentre. Toutefois, les valeurs de M_L annoncées diffèrent parfois selon les instituts de géophysique, car ils n'utilisent pas toujours les mêmes réseaux de stations sismologiques ni les mêmes instruments. D'autres problèmes, comme la saturation du signal lors de forts séismes, compliquent également le calcul de la magnitude locale. Pour toutes ces raisons, les sismologues préfèrent la magnitude de moment M_W. Elle est obtenue par une analyse plus complète du signal sismique, qui reflète plus fidèlement l'énergie de la rupture libérée pendant le séisme. Cette méthode s'affranchit des difficultés rencontrées avec la magnitude locale et livre des valeurs plus homogènes.

Autre intérêt, la magnitude de moment aide à estimer les paramètres physiques de la rupture sismique comme la surface de la rupture (en kilomètres carrés) et l'amplitude du déplacement au niveau de celle-ci (en mètres). En conséquence, les experts sont en mesure de faire le lien entre la magnitude de moment et des relevés effectués en surface sur le terrain par les géologues. Par exemple, à partir de la longueur de la rupture, juste après un séisme ou très longtemps après, dans le cas d'études paléosismologiques, on obtient une estimation de la magnitude du tremblement de terre.

> profil de distribution du déplacement vertical le long de la faille à partir de quatorze coupes perpendiculaires. La déformation est plus importante et plus localisée dans la partie sud de la faille, avec un déplacement vertical maximum de 23 centimètres. Dans la partie nord, la déformation de surface est répartie sur une zone plus large, de 100 à 600 mètres, avec un déplacement vertical maximum de 13 centimètres. Comment ces déformations se sont-elles traduites en surface?

À LA RECHERCHE D'INDICES

Grâce à des analyses radar (InSAR), les premières traces en surface du séisme ont pu être découvertes 48 heures après le tremblement de terre (*voir la figure ci-contre*). Compte tenu de la densité de végétation qui couvre une grande partie de la région autour de l'épicentre, ces recherches se sont concentrées sur les routes et les chemins traversant la faille de La Rouvière, sur laquelle se calquait la ligne de discontinuité observée dans les données InSAR. Pour évaluer la continuité de la rupture sous le couvert forestier, un levé topographique par lidar (une sorte de radar utilisant de la lumière plutôt que des ondes radio) aéroporté a complété les investigations sur le terrain. Les traces repérées correspondent principalement à des fissures ouvertes ayant une orientation nord-est sud-ouest. Au total, une vingtaine d'indices ponctuels ont été observés sur une longueur de 4,5 kilomètres, le long de l'escarpement qui marque la faille de La Rouvière dans le paysage. Ils confirmaient que la rupture sismique associée au séisme du Teil s'est bien produite le long de cette faille ancienne.

Les indices les plus clairs ont été mesurés avec un scanner laser terrestre, révélant un soulèvement du sol compris entre 2,5 et 13 centimètres. C'est un peu moins de la moitié du déplacement estimé à partir de l'analyse InSAR, ce qui suggère que plus de 50% de la déformation s'est répartie à côté de la faille dans une zone de 100 à 600 mètres de largeur. Précisons que, compte tenu de l'inclinaison de la faille, les 2,5 à 13 centimètres précédents correspondent en fait à un déplacement total en surface le long de la faille compris entre 5 et 25 centimètres.

Une coupe géologique éclaire la relation entre l'ancienne faille normale (c'est-à-dire un plan incliné séparant deux compartiments rocheux) datant de l'Oligocène (il y a 20 à 30 millions d'années), et la rupture sismique associée au séisme du Teil qui fait rejouer cette faille dans un mouvement inverse (*voir la figure page ci-contre*). Cette coupe géologique montre que les différentes failles composant la terminaison nord-est du système des Cévennes correspondent à d'anciennes failles normales. L'examen des principales unités sédimentaires montre que le processus d'inversion est très jeune et très lent.

Le séisme du Teil s'est manifesté par diverses modifications géomorphologiques comme ce petit escarpement de faille recoupant une piste forestière. La petite tranchée creusée perpendiculairement à l'escarpement montre le plan de rupture plongeant vers la gauche.

EFFACÉ DU PAYSAGE ?

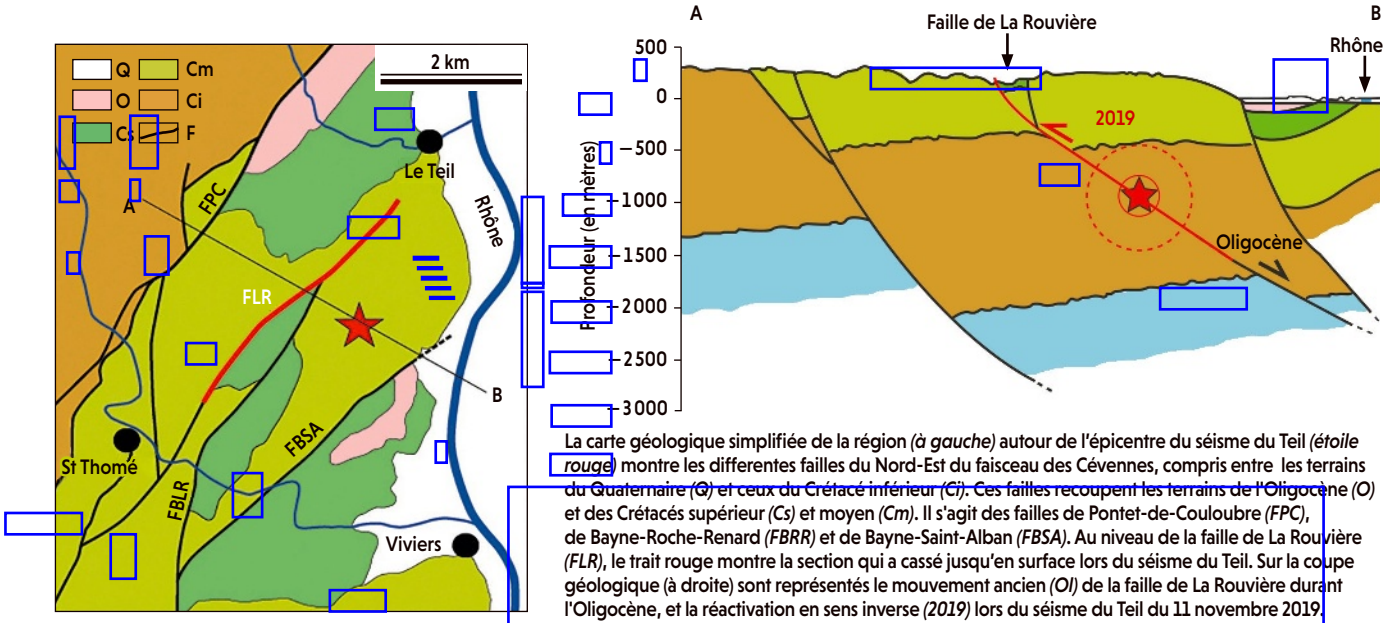
Toutes ces observations montrent que le séisme du Teil est associé à la réactivation de la faille de La Rouvière dans sa partie superficielle. Une des particularités de l'événement est sa remarquable rupture de surface. À l'échelle mondiale, un événement de si faible magnitude a une très faible probabilité (inférieure à 10%) de rompre la surface, mais la superficialité du foyer explique ce phénomène rare. La faille de La Rouvière n'a pas été précédemment identifiée comme active, car elle ne présentait aucune sismicité notable détectable par des instruments. De même, aucune expression géomorphologique, c'est-à-dire aucun élément du paysage, ne trahissait une activité tectonique postérieure à l'Oligocène.

L'absence de preuves géomorphologiques avant le séisme du Teil suggère que la faille n'avait pas rompu la surface depuis longtemps, c'est-à-dire plusieurs centaines voire milliers d'années. Peut-être est-ce dû à de très longs intervalles de temps entre les séismes du fait du très faible taux de déformation qui caractérise la France métropolitaine. Ainsi, dans la partie sud-est du Massif central, ce taux de déformation annuel correspond à un raccourcissement de 0,1 millimètre sur 10 kilomètres de distance (200 fois moins vite que dans l'Himalaya) : imaginez-vous dans un étau de 10 kilomètres de large dont les deux mâchoires se rapprochent de 0,01 millimètre chaque année! C'est très lent.

Il est donc possible que des ruptures ayant atteint la surface par le passé aient été effacées du paysage par l'érosion. De plus, si l'on suppose que la déformation est répartie sur différentes failles du système cévenol, et donc diluée en quelque sorte, la préservation de marqueurs géomorphologiques tels que des escarpements de failles est encore plus improbable.

L'ensemble de ces éléments soulève plusieurs questions importantes quant à l'estimation de l'aléa sismique dans les régions comme

© J.-F. Ritz



La carte géologique simplifiée de la région *(à gauche)* autour de l'épicentre du séisme du Teil *(étoile rouge)* montre les differentes failles du Nord-Est du faisceau des Cévennes, compris entre les terrains du Quaternaire *(Q)* et ceux du Crétacé inférieur *(Ci)*. Ces failles recoupent les terrains de l'Oligocène *(O)* et des Crétacés supérieur *(Cs)* et moyen *(Cm)*. Il s'agit des failles de Pontet-de-Couloubre *(FPC)*, de Bayne-Roche-Renard *(FBRR)* et de Bayne-Saint-Alban *(FBSA)*. Au niveau de la faille de La Rouvière *(FLR)*, le trait rouge montre la section qui a cassé jusqu'en surface lors du séisme du Teil. Sur la coupe géologique (à droite) sont représentés le mouvement ancien *(Ol)* de la faille de La Rouvière durant l'Oligocène, et la réactivation en sens inverse *(2019)* lors du séisme du Teil du 11 novembre 2019.

la France métropolitaine et plus généralement l'Europe de l'Ouest. La première est de se demander si les failles ou segments de failles composant le système nord-est cévenol, incluant la faille de La Rouvière, avaient déjà rompu ces derniers millions d'années, et, le cas échéant, avec quelle magnitude. Pour répondre, plusieurs études sont nécessaires. D'abord, une imagerie géophysique profonde aidera à localiser ces structures en profondeur, à définir leurs géométries, leurs dimensions et leur capacité à produire des tremblements de terre de magnitude supérieure à 6. En parallèle, des études paléosismologiques renseigneront sur l'âge des séismes anciens dont on déduira un intervalle de récurrence moyen, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux séismes ayant provoqué des ruptures de surface. L'objectif de ces travaux est d'améliorer le modèle de failles utilisé dans les analyses de risque sismique.

UN RISQUE À RÉÉVALUER

De plus en plus, le risque de rupture en surface est considéré comme une menace importante pour les infrastructures et les installations sensibles dont la tolérance aux instabilités du sol est très faible. En France et dans les zones intraplaques avoisinantes, ce risque est rarement pris en compte. Pourtant, il existe bien, comme le montre le cas du séisme du Teil. Aujourd'hui, cet aléa est essentiellement analysé à partir d'approches empiriques pour anticiper la localisation et l'amplitude du glissement localisé le long d'une faille active en surface. Un couloir sécurisé où toute infrastructure sensible serait proscrite, ou au moins adaptée, peut être défini autour de la faille sismique ainsi répertoriée. Mais toutes ces approches empiriques souffrent de la rareté des données, notamment dans la plage des magnitudes faibles à modérées.

Enfin, le rôle même des processus tectoniques à long terme, s'étalant sur plusieurs centaines de millions d'années, liés aux mouvements des plaques lithosphériques lointaines, est remis en question. En effet, la France métropolitaine ainsi que ses pays voisins de l'Europe de l'Ouest correspondent à des régions continentales stables, où nous l'avons vu, les taux de déformations sont très faibles. Et il n'est pas impossible que la sismicité de ces régions soit davantage liée à d'autres types de mécanismes « tectoniques » qui s'expriment à plus court terme que la tectonique des plaques. Des études récentes suggèrent par exemple que le champ de contraintes régnant actuellement dans la région où a eu lieu le séisme du Teil serait lié au soulèvement du Massif central et des Alpes induit par des processus d'érosion ou consécutif à la fonte des glaces lors de la dernière déglaciation il y a entre 15 000 et 18 000 ans (on parle de rebond postglaciaire). Résoudre ces problèmes géodynamiques requiert l'acquisition de données géologiques et géophysiques supplémentaires ainsi que la mise en œuvre de nouveaux modèles. En d'autres termes, plus les experts acquerront des connaissances, plus ils seront en mesure d'être précis dans la détermination de l'aléa sismique.

Alors seulement, on pourra vraiment savoir si à l'instar de la faille de La Rouvière, il existe en France, par exemple dans le Massif armoricain, les Alpes, les Pyrénées, les Vosges... d'autres failles anciennes, capables de produire des séismes avec ruptures de surface. Rappelons que la métropole compte une dizaine de grandes zones de failles. Plusieurs projets en cours visent à réévaluer la sismicité dans les zones intracontinentales stables pour, à terme, redessiner la carte des failles actives en France. ■

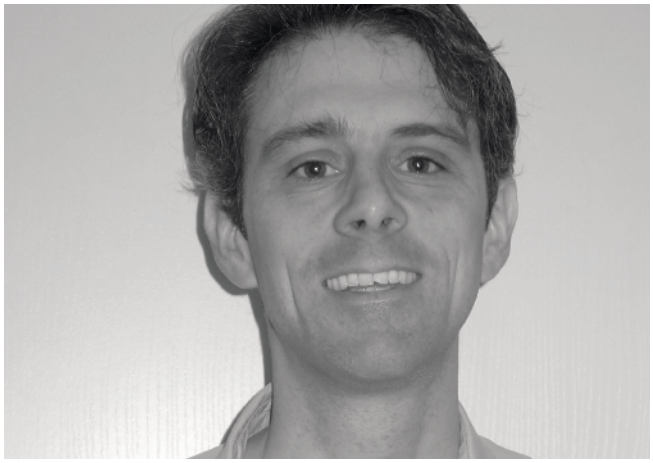
BIBLIOGRAPHIE

J.-F. RITZ *ET AL.*, Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, *Commun. Earth & Environ.*, pp. 10, 2020.

K. MANCHUEL *ET AL.*, The French seismic CATalogue (FCAT-17), *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 16, pp. 2227-2251, 2018.

© D'après J.-F. Ritz et al., 2020

Nathalie Feuillet



Arnaud Lemarchand

Mayotte a tremblé sous le coup de la plus grande éruption sous-marine jamais documentée

Mayotte ne connaissait pas de séismes importants. La situation a changé en 2018 quand cette petite île française située entre Madagascar et le continent africain a connu une série de tremblements de terre, parfois violents. Comment expliquer ces secousses ? Par une activité volcanique inédite. Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand, de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP), racontent l'histoire de cette découverte et les recherches entreprises pour mieux comprendre le phénomène et prévenir d'éventuels risques.

BIO EXPRESS

Nathalie Feuillet est responsable de l'équipe de Géosciences marines à l'IPGP. Elle codirige des missions *Mayobs* dédiées aux phénomènes sismiques et volcaniques touchant l'île de Mayotte depuis 2018.

Arnaud Lemarchand est ingénieur de recherche à l'IPGP.

Quelle est l'origine du volcanisme à Mayotte ?

Nathalie Feuillet : Mayotte, dans l'archipel des Comores, est une île volcanique qui a commencé à s'édifier il y a environ 20 millions d'années. L'origine exacte de son volcanisme est controversée. L'une des hypothèses est la présence d'un point chaud, c'est-à-dire d'une remontée massive de matière chaude depuis les profondeurs du manteau terrestre. Une autre attribue ce volcanisme à un système de fractures faisant partie du rift est-africain, ce grand fossé parsemé de volcans courant de l'Éthiopie au Malawi, qui s'élargit et fracture lentement l'Afrique.

Selon la théorie du point chaud, Mayotte serait la plus ancienne île de tout l'archipel des Comores, et l'île de la Grande Comore serait le témoignage le plus récent de sa présence. Toutefois, la morphologie bien préservée de cônes

volcaniques et de cratères à l'est de Mayotte – à Petite-Terre et à Mamoudzou – suggère une activité volcanique récente. Elle est attestée par le carottage, réalisé en 2005 dans le lagon de Mayotte par une équipe franco-allemande, qui a révélé un dépôt de cendre volcanique daté de quelques milliers d'années seulement. Tous ces indices d'activité récente, et surtout la découverte d'une nouvelle éruption et d'un nouveau volcan au large de l'île, nous amènent à revoir nos théories sur l'origine de Mayotte.

Comment a-t-on découvert l'éruption ?

Nathalie Feuillet : Tout a commencé le 10 mai 2018 par de très forts séismes à l'est de Mayotte. Le 15 mai, un séisme de magnitude 5,9 a fait des dégâts sur l'île et apeuré la population, ce qui, de mémoire humaine, n'était jamais arrivé. Au départ, nous n'avions aucune idée précise de l'origine du phénomène, puisque la région de Mayotte n'était considérée ni à risque sismique, ni à risque volcanique. Les séismes étaient organisés en essaims, c'est-à-dire en séries de tremblements produits sur des périodes de temps courtes. Cela suggérait autre chose qu'un événement tectonique ponctuel ; c'était plutôt caractéristique d'une activité volcanique.

Vous avez donc relié ces essaims de séismes à un possible volcanisme ?

Nathalie Feuillet : Oui, d'autant plus que l'activité sismique s'est poursuivie pendant deux mois. Il y a eu un bref retour au calme à l'été 2018, mais qui a très vite été suivi d'une reprise de l'activité sismique en septembre. En outre, les stations géodésiques de l'île ont enregistré de très importantes déformations du sol : Mayotte se déplaçait vers Madagascar et s'enfonçait de plusieurs centimètres par an, ce qui est considérable. Ces signes faisaient penser à la vidange d'un réservoir magmatique.

Le 11 novembre 2018, un étrange phénomène est venu conforter cette hypothèse : vingt minutes durant, les stations sismiques du monde entier ont enregistré un fort signal sismique de très basse fréquence issu de quelque part à l'est de Mayotte ; or ce genre de signal est caractéristique d'une activité volcanique. L'occurrence de cet événement a provoqué une intense discussion sur Twitter entre sismologues de tous les pays. À partir de ce moment-là, nous savions avoir affaire à un phénomène magmatique important.

Où pouvait-il se situer ?

Nathalie Feuillet : Les données des stations sismologiques mondiales et régionales indiquaient que le phénomène se déroulait en mer à l'est de Mayotte, mais on ne savait pas où exactement : les sources sismiques se trouvaient dans une vaste zone située à quelques dizaines de kilomètres de l'île. En février 2019, nous sommes allés y placer six « sismomètres fond de mer », des instruments qui enregistrent les mouvements du fond marin. Nous avons ainsi découvert que les sources des séismes étaient toutes localisées le long d'un alignement de volcans sous-marins. La grande majorité d'entre elles se trouvaient sous des structures volcaniques situées à quelques kilomètres seulement de Petite-Terre, à des profondeurs se mesurant en dizaines de kilomètres.

Êtes-vous aussi allés observer ce qui se passait au fond ?

Nathalie Feuillet : En mai 2019, grâce au soutien de l'État, le *Marion Dufresne* a été affrété. Le navire amiral de la flotte des TAAF, la collectivité des Terres australes et antarctiques françaises, possède en effet des instruments qui nous ont permis de mener la campagne d'observation *Mayobs 1*. Notre objectif était d'acquérir les données des sondeurs multifaisceaux de coque afin de faire de la bathymétrie, c'est-à-dire la cartographie du fond océanique, mais aussi d'obtenir des images de la colonne d'eau et du fond, de sonder les sédiments et finalement de recueillir des données magnétiques et gravimétriques. Nous voulions mettre en évidence des traces d'activité volcanique récente sur le fond océanique.

Et en avez-vous trouvé ?

Nathalie Feuillet : Un soir, l'équipe de quart a détecté un important panache acoustique se propageant dans la colonne d'eau. Un tel phénomène résulte d'une variation de la vitesse des ondes sonores et peut être dû au passage d'une baleine, d'un banc de poissons, d'un courant d'eau, etc. Nous avons tout de suite soupçonné que l'origine de ce panache était plutôt une remontée de gaz volcaniques. Le panache que nous voyions au-dessus d'un fond à 3000 mètres, situé à 50 kilomètres à l'est de Mayotte, mesurait près de 2 kilomètres de haut. Nous n'avions jamais rien vu de tel. Ce que nous observions était tout simplement extraordinaire.

Pour savoir d'où il venait, nous avons comparé nos données bathymétriques à des données plus anciennes collectées dans la zone en 2014 par le *Beautemps-Beaupré*, le navire océanographique du Shom, le Service hydrographique et océanographique de la Marine. Nous avons ainsi mis en évidence un nouveau relief : nous assistions à la naissance en direct sur le territoire français d'un grand volcan sous-marin…

Grand comment ?

Nathalie Feuillet : Il mesure 5 kilomètres de diamètre et plus de 800 mètres de haut. Cela représente une énorme quantité de lave déversée : de l'ordre de 5 kilomètres cubes en un an environ. C'est comme si l'on avait recouvert la moitié de la ville de Paris d'une couche haute de plusieurs centaines de mètres de lave. Le volcan mesure trois fois la tour Eiffel. C'est la plus grande éruption sous-marine jamais documentée.

Qu'avez-vous alors fait ?

Nathalie Feuillet : Nous avons pu collecter plusieurs kilogrammes de lave fraîche, tout juste mise en place, sur le flanc du >

NOUS AVONS ASSISTÉ À LA NAISSANCE EN DIRECT D'UN GRAND VOLCAN SOUS-MARIN

© Pour la Science, d'après Eric Gaba/Wikimedia Commons

volcan. À peine déposées sur le pont du *Marion Dufresne*, ces roches ont explosé, projetant des fragments à plusieurs mètres de hauteur. Il s'agissait de ce que l'on nomme en anglais des « *popping rocks* », des roches qui explosent parce qu'elles sont pleines de bulles de gaz volcanique. Lorsqu'elles arrivent en surface, du fait de la différence de pression entre le fond de la mer et la surface, le gaz contenu dans ces bulles se décomprime en brisant la roche qui l'enferme. Ces roches sont rares. Seules quelques expéditions scientifiques en ont récolté, sur des dorsales océaniques principalement. C'est, à ma connaissance, la première fois qu'on en récolte de toutes fraîches.

A-t-on une idée de l'origine de l'éruption ?

Nathalie Feuillet : Deux équipes, celle de Simone Cesca, de l'Institut allemand pour la recherche sur les géosciences à Potsdam, et celle d'Anne Lemoine, du BRGM, le Bureau de recherches géologiques et minières, ont publié des résultats qui permettent d'avancer sur la compréhension de cette éruption. L'équipe de Simone Cesca a exploité les données des séismes forts collectées dès mai 2018 par le réseau mondial de stations sismologiques. Celle d'Anne Lemoine a utilisé des données des réseaux sismologiques terrestres de Mayotte et des autres îles des Comores. Les deux études ont aussi mis à profit des données géodésiques disponibles sur l'île de Mayotte. Ces chercheurs ont pu localiser les sources des séismes et détecter de nombreux signaux de basse fréquence similaires à celui du 11 novembre 2018. Cela a permis de diagnostiquer une remontée de magma depuis un réservoir profond jusqu'à la surface.

Quel mécanisme d'éruption proposent-elles ?

Nathalie Feuillet : Avec ses collègues, Simone Cesca propose que du magma ait migré jusqu'en surface, jusqu'à l'emplacement du nouveau volcan, depuis une chambre magmatique située à 30 kilomètres de profondeur et à 30 kilomètres à l'est de Mayotte. Quand le magma migre vers la surface, la chambre magmatique se vide, ce qui peut provoquer un effondrement du fond marin en activant des failles situées directement à la verticale de la chambre. Ce genre d'effondrement est bien connu, mais très rare. Il s'est cependant produit récemment, en 2007 à La Réunion, en 2014 en Islande et en 2018 à Hawaii. Cependant, le groupe de Simone Cesca a calculé que pour que cela arrive, il faudrait que 230 kilomètres cubes de magma sortent du réservoir, soit 50 fois plus que le volume déjà émis par le nouveau volcan. Pour l'instant, ce scénario est très peu probable, mais il faut tout de même en tenir compte pour évaluer les risques.

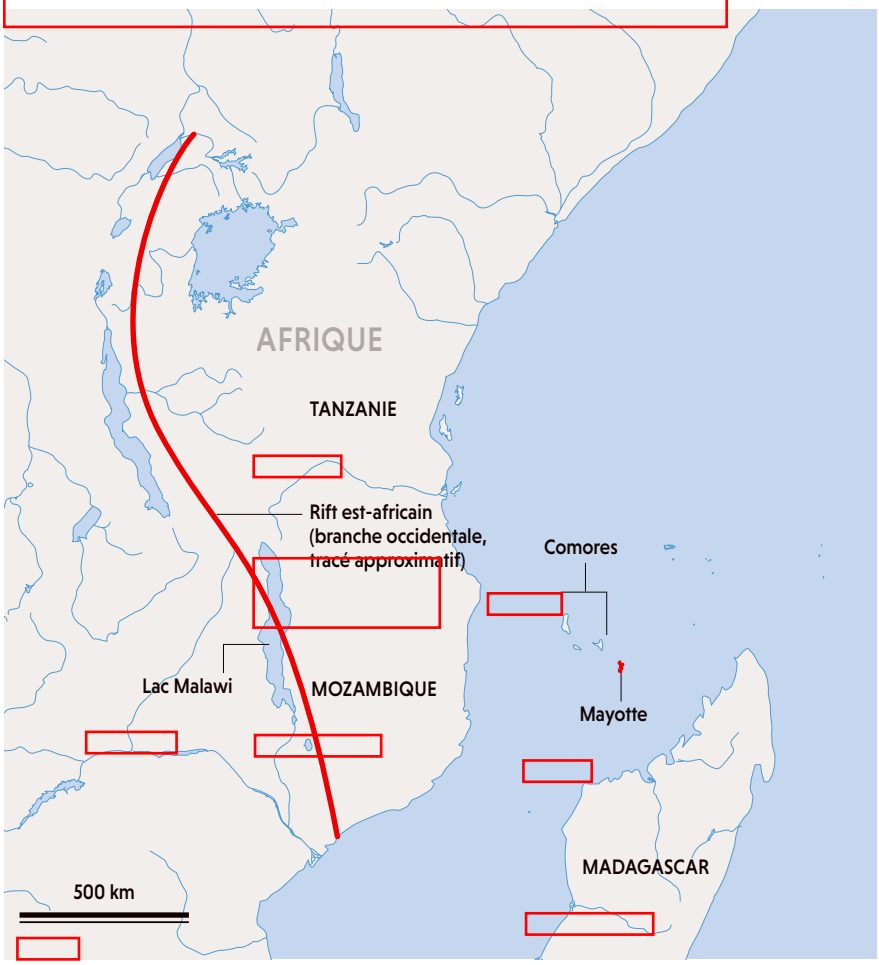
Êtes-vous d'accord avec ce mécanisme ?

Nathalie Feuillet : Dans l'ensemble, oui. Nos données confirment en effet l'hypothèse de l'existence d'un réservoir profond en train de se vidanger à l'est de Mayotte. Comme nous avons utilisé des données en mer et que nous étions au plus près du phénomène, nous pouvons le décrire avec beaucoup plus de précision. Mais surtout, nos données sont indispensables pour documenter les traces d'activité volcanique sur le fond marin. La découverte du volcan a permis à nos collègues d'affiner leur scénario.

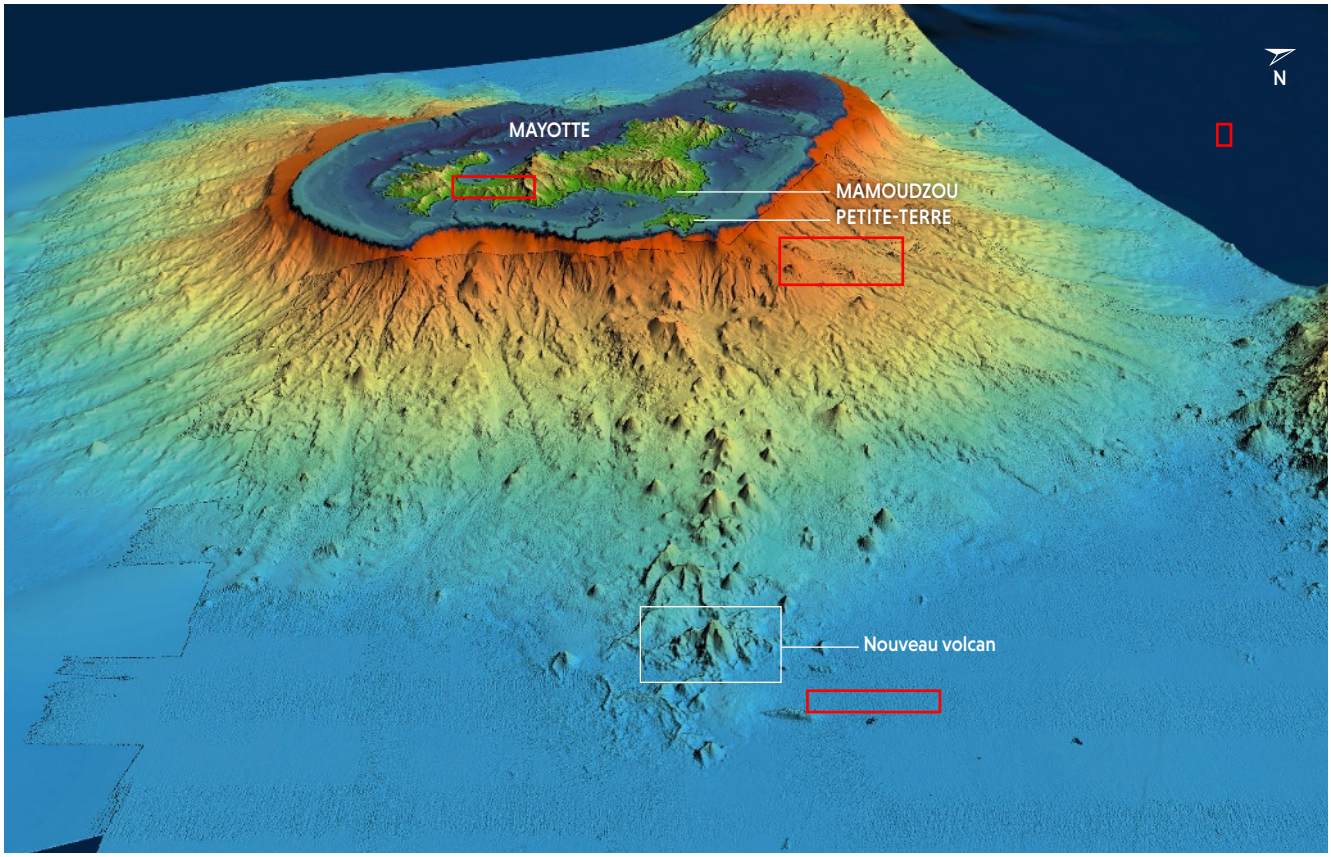
Que s'est-il passé depuis la découverte du volcan ?

Nathalie Feuillet : Après la campagne *Mayobs 1*, l'État a rendu possible la création du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (Revosima). Ce réseau est opéré par l'IPGP en partenariat avec le CNRS, l'Ifremer et le BRGM. Depuis, plusieurs autres campagnes à la mer ont eu lieu

LE NOUVEAU VOLCAN MESURE 5 KILOMÈTRES DE DIAMÈTRE ET PLUS DE 800 MÈTRES DE HAUT



« Mayotte a tremblé sous le coup de la plus grande éruption sous-marine jamais documentée »



© Équipe *Mayobs 4* CNRS/IPGP/Ifremer/BRGM/université de Paris

L'île de Mayotte *(ci-dessus)* est la partie émergée d'un grand édifice volcanique datant d'une vingtaine de millions d'années. Elle fait partie de l'archipel des Comores, qui pourrait se trouver dans un système de fractures associé à la branche orientale du rift est-africain *(la ligne rouge sur la carte page ci-contre)*. En mai 2019, une mission française embarquée a découvert à 50 kilomètres à l'est de Mayotte un nouveau volcan. Il résulterait de l'épanchement du magma d'une chambre magmatique allongée, située à une quinzaine de kilomètres de profondeur entre Mayotte et le nouveau volcan.

dans le cadre du Revosima. Plusieurs d'entre elles avaient pour but de poser puis de récupérer les sismomètres fond de mer et d'analyser les signaux enregistrés. L'idée est d'avoir un enregistrement le plus continu possible de l'activité sismique. Depuis mai 2019, l'activité sismique se poursuit dans les mêmes zones, mais a largement diminué. La déformation de l'île a aussi beaucoup ralenti.

Au cours des campagnes qui ont succédé à la campagne *Mayobs 1*, et ce jusqu'à la dernière mission avec le sondeur multifaisceaux, en août 2019, nous avons montré que l'éruption était toujours en cours, en mettant en évidence de nouvelles coulées importantes des deux côtés du volcan. Certaines mesurent jusqu'à 150 mètres de hauteur et couvrent plusieurs kilomètres carrés. Cependant, nous avons constaté que le nouveau volcan ne grandit plus. Les panaches de près de 2 kilomètres de haut observés en mai et juin 2019 avaient disparu en juillet, mais d'autres, moins hauts, s'élevaient au-dessus des coulées récentes.

Nous avons aussi observé des coulées à l'aide d'une caméra. Elles étaient formées de roches magmatiques effusives, comme celles que l'on observe à Hawaii et sur d'autres volcans de point chaud, ou encore le long des dorsales océaniques. Parce qu'elles sont constituées de nombreux bourrelets parallèles, ces laves sont dites « cordées » ou « en coussins ». Nous avons prélevé plus d'une dizaine d'échantillons pour analyser leur composition chimique et pétrologique et en savoir plus sur la formation du volcan.

L'activité volcanique pourrait-elle se poursuivre ?

Nathalie Feuillet : Le groupe de Simone Cesca suppose un réservoir d'une quinzaine de kilomètres de large, donc beaucoup plus grand que ce qui a déjà été vidangé. Le matériel pourrait être suffisant pour que l'éruption se prolonge, surtout si le réservoir continue à être alimenté. Il faut aussi qu'une certaine pression se maintienne dans le réservoir pour que le flux de magma vers la surface se poursuive. Cela pourrait être le cas si le toit du réservoir continue de s'effondrer. Certaines grandes éruptions dans le rift africain ont duré plusieurs années et certains volcans sous-marins de la zone des Mariannes, notamment le Mata Ouest, près des Tonga, sont en éruption depuis plusieurs années.

Quels risques cela représenterait-il pour les Mahorais ?

Nathalie Feuillet : Les habitants de Mayotte ont *a priori* peu à craindre de l'éruption sous-marine distante située près du nouveau volcan; mais il est possible que de nouveaux sites éruptifs apparaissent plus près de l'île, sur la pente insulaire supérieure, là où la plupart des séismes ont lieu. On ne peut pas non plus exclure une éruption à terre, puisque des cônes volcaniques se sont formés à Petite-Terre il y a plusieurs milliers d'années, ce qui est court à l'échelle des temps géologiques. C'est bien pour cela qu'il est indispensable de surveiller ce volcan dans le cadre du Revosima.

> **Cette surveillance peut-elle être permanente, étant donné le coût élevé des campagnes océanographiques ?**

Arnaud Lemarchand : Le Revosima surveille déjà au jour le jour l'activité sismo-volcanique à l'aide des réseaux de capteurs à Mayotte et sur l'île des Glorieuses, et il s'appuie aussi sur le réseau des stations géophysiques régionales installées en Grande Comore, à Madagascar et dans certains pays africains longeant le canal du Mozambique. Toutefois, sans les données de capteurs placés au plus proche de l'activité, cette surveillance reste imprécise, et il faut les affiner avec des données prélevées en mer. L'État a financé des campagnes océanographiques, pour plusieurs millions d'euros chacune. Elles ont notamment servi à récupérer les sismomètres fond de mer. Cette façon de fonctionner signifie aussi que l'on ne peut suivre les évolutions du volcan qu'avec trois ou quatre mois de retard, ce qui empêche de suivre les phénomènes rapides, comme les migrations de magma qui peuvent se produire en quelques semaines, voire quelques jours ou moins encore… Il nous semble donc qu'il faut mettre en place une surveillance plus constante et moins chère…

De quelle façon ?

Arnaud Lemarchand : Nous proposons d'installer sur le fond marin un observatoire, relié par câble à Mayotte, proche des côtes, qui centralisera les informations et les diffusera à l'observatoire du Piton de la Fournaise à La Réunion, le centre opérationnel de Revosima. Le dis-

ON SURVEILLE AU JOUR LE JOUR L'ACTIVITÉ SISMOVOLCANIQUE À L'AIDE DE RÉSEAUX DE CAPTEURS

conçu pour surveiller la zone sismique principale, située à quelque dix kilomètres de Petite-Terre. Il devrait nous permettre de connaître en temps réel l'activité sismique, les sources de déformations du sol et de surveiller les zones les plus susceptibles de glissements de terrain sous-marins, capables de déclencher des tsunamis.

En quoi consistera cet observatoire ?

Arnaud Lemarchand : Il s'agit en fait d'un réseau d'instruments variés visant à surveiller plusieurs grandeurs physiques. Les stations de mesure seront toutes reliées les unes aux autres par un câble qui transmet les données par fibres optiques et qui alimente les capteurs en électricité. Ce câble arrivera dans un local à terre positif est pensé afin de ne pas perdre tout le système en cas d'avarie sur un tronçon de câble ou une station. L'ensemble du projet repose sur les technologies très bien maîtrisées par les compagnies de télécommunication, qui exploitent les nombreux câbles sous-marins assurant 90 % du trafic mondial de l'internet. La conception du système d'observation sous-marin bénéficie aussi de l'expérience acquise par l'observatoire océanographique européen Emso (European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory).

Quelles grandeurs physiques surveillera-t-on ?

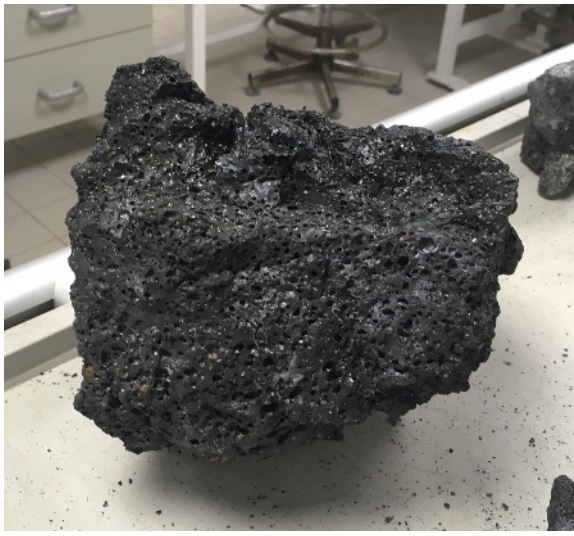
Arnaud Lemarchand : Les stations abriteront non seulement des sismomètres, pour mesurer les vibrations du

Le *Marion Dufresne* est le navire amiral des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF). Il est spécialement équipé pour assurer sur de très grandes distances ses missions logistiques et sanitaires, mais aussi océanographiques.

sol et bien détecter et localiser les microséismes, mais aussi des capteurs de déformation du terrain, pour détecter par exemple des gonflements du fond marin en réponse à des remontées de magma ou de gaz sous-jacentes ; des capteurs électriques et magnétiques pour détecter des changements de la résistance électrique du sous-sol, qui signeraient la remontée de fluides volcaniques ; des capteurs géochimiques, afin de surveiller les sites de dégazage identifiés lors des campagnes *Mayobs* de 2019 ; enfin, des capteurs conçus pour suivre l'installation d'organismes vivants sur les nouveaux reliefs sous-marins.

Certaines des fibres optiques contenues dans les câbles sous-marins serviront non pas à transmettre à terre les mesures des capteurs électriques, mais permettront d'opérer deux types de dispositifs de mesure très innovants, purement optiques. Un premier type, commercialisé – le « DAS » (*distributed acoustic sensing*) –, consiste à envoyer depuis la terre une impulsion laser à haute cadence dans la fibre, d'en mesurer la diffusion en retour – c'est-à-dire les échos –, et d'analyser les interférences entre échos de segments proches. Ces interférences sont très sensibles aux déformations de la fibre lors du passage des ondes sismiques. Leur analyse en temps réel permet d'obtenir des milliers de points de mesure de déformation tout le long de la fibre, qui peut faire des dizaines de kilomètres de long, ce qui fait du câble une sorte d'antenne sismique de milliers de sismomètres.

Un deuxième type de mesure optique, plus précis, se fait uniquement à l'extrémité de la fibre, le faisceau laser pointant sur la partie déformable d'un capteur et s'y réfléchissant : ce peut être la masse mobile d'un sismomètre, ou la membrane déformable d'un pressiomètre, appareil qui suit les mouvements verticaux du fond marin. L'interférence produite entre la réflexion sur cette cible mobile et la réflexion en bout de fibre produit un signal lumineux qui peut être traduit en mouvement du sol pour le sismomètre – donc en vibration –, ou en pression d'eau pour le pressiomètre – donc en profondeur. Parce qu'ils sont purement optiques, ces systèmes allient grande résolution et grande robustesse : leurs capteurs en mer ne peuvent pas avoir de panne électronique, l'interrogateur et toute la partie électronique étant à terre, à des dizaines de kilomètres des zones de mesure.



Ce *popping rock* est un fragment de lave solidifiée susceptible d'éclater parce qu'il contient des bulles de gaz volcanique restées à la pression du fond (de l'ordre de 300 bars). Il a été remonté de quelque 3 000 mètres de profondeur près de Mayotte.

Où sera installé ce réseau de surveillance ?

Arnaud Lemarchand : Nous prévoyons de l'installer sur la zone de l'essaim sismique principal, à une dizaine de kilomètres de Petite-Terre. C'est de là que peuvent venir d'éventuels risques pour les Mahorais, de sorte qu'elle exige plus d'attention que le nouveau volcan, plus lointain.

Ce réseau pourrait-il être détruit par une nouvelle éruption ?

Arnaud Lemarchand : Les stations installées près des panaches acoustiques seront en effet vulnérables. Les campagnes océanographiques nous ont cependant permis d'identifier les canyons et les coulées de lave récentes que le tracé du câble contourne. Seuls deux câbles secondaires équipés de fibres optiques, utilisées comme capteurs afin de mesurer les contraintes réparties le long du câble, traversent les zones en voie de déstabilisation, où pourraient se déclencher des glissements de terrain qui, s'ils se produisent, détruiront évidemment ces câbles secondaires..

Quand ce réseau de surveillance sera-t-il en place ?

Arnaud Lemarchand : Notre projet de système d'observation câblé est soumis au Programme d'investissements d'avenir (PIA). Il a été conçu avec toute la communauté scientifique nationale des géosciences et biologie marines et avec quatre grands instituts collaborant dans le cadre du Revosima. S'il est accepté, il débutera en 2021 pour une mise en place un à deux ans après. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANÇOIS SAVATIER

BIBLIOGRAPHIE

S. CESCA *ET AL.*, Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation, *Nature Geoscience*, vol. 13(1), pp. 87-93, 2020.

A. LEMOINE *ET AL.*, The 2018-2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros Islands: Seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption, *Geophysical Journal International*, vol. 223, pp. 22-44, 2020.

F. PAQUET *ET AL.*, The Mayotte seismo-volcanic crisis: Characterizing a reactivated volcanic ridge from the upper slope to the abyssal plain using multibeam batymetry and backscatter data, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, décembre 2019. https://bit.ly/3dv9f5J

Éphémères deltas de lave

Le 31 décembre 2016, à Hawaii, un delta formé en quelques années par des coulées de lave s'est effondré dans l'océan. Comment naît et meurt une telle plateforme, créée par le brusque refroidissement de la lave au contact de l'eau de mer ? Réponse en images.

© Meister Photos/Shutterstock.com

LES AUTEURS

MICHEL DETAY
est géologue et photographe résidant à Hong Kong.

PIERRE THOMAS
est géologue et planétologue, professeur émérite à l'École normale supérieure de Lyon

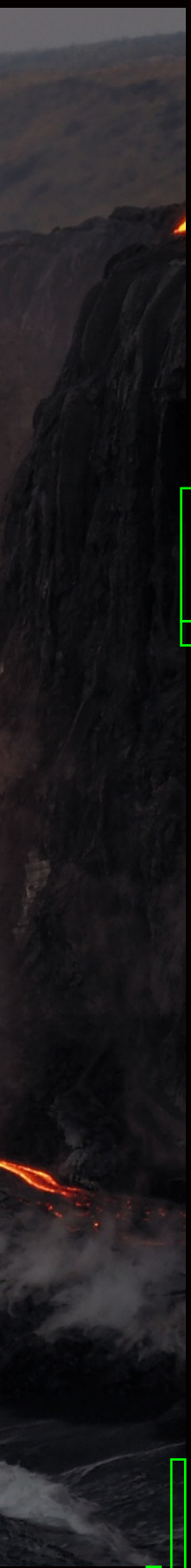
À Hawaii, le Kīlauea, l'un des volcans les plus actifs de la planète, déverse sur ses flancs une lave nommée pāhoehoe («rivière de satin» en hawaiien), très fluide parce que pauvre en silice et complètement dégazée. Celle-ci s'écoule à l'intérieur de tunnels jusqu'à la mer. Ses arrivées successives édifient régulièrement des plateformes instables qui s'avancent sur la mer: des «deltas de lave». Les images présentées ici sont celles du delta de Kamokuna, depuis sa formation récente jusqu'à son écroulement fin 2016.

Ces structures éphémères doivent leur existence au fait que des tunnels – les tubes de lave – acheminent le magma jusqu'au rivage sans grande déperdition de chaleur: la température baisse de moins de 0,6 °C par kilomètre parcouru. Situé sur la pente est du volcan, le tunnel de Kazumura, par exemple, franchit 1102 mètres de dénivelé et s'étend sur plus de 65 kilomètres! En interagissant avec l'eau de l'océan, les roches en fusion produisent tout un cortège de matériaux, la plupart fragiles, qui vont constituer le soubassement des deltas. Généralement, ces derniers se développent sur une largeur d'environ 1 kilomètre et s'avancent de plusieurs centaines de mètres dans la mer. Des croissances journalières atteignant 4 hectares ont déjà été observées dans le cas d'un delta de ce type, qui, juste avant de s'effondrer, mesurait 2,9 kilomètres de long et 500 mètres de large.

Les formations magmatiques disparaissent et se reforment le plus souvent de façon cyclique. Ainsi, à Hawaii, 31 effondrements se sont produits entre 1988 et 1989. L'effondrement s'accompagne parfois d'un retrait de la côte de plusieurs centaines de mètres: il était compris, dans les cas récents, entre 200 et 400 mètres. ■

AU-DESSUS ET EN DESSOUS

Au cours de la formation d'un nouveau delta de lave, des coulées de lave pāhoehoe, très fluides, débouchent dans l'océan. Celles visibles sur cette image nocturne sont des coulées en surface; elles sont accompagnées de coulées invisibles, qui cheminent à l'intérieur de tunnels souterrains.



© USGS

© Dirker/Shutterstock.com

DES DRAPS DANS L'OCÉAN

Quand la coulée de lave pāhoehoe atteint la mer, les interactions entre la roche en fusion et l'eau marine sont en général assez peu violentes. La lave s'écoule simplement en draperies par-dessus les anciennes falaises et contribue à édifier la plateforme, qui, petit à petit, s'avance dans l'océan.

ROUTE COUPÉE

Un passage en hélicoptère au-dessus du champ de lave du Kīlauea offre l'occasion de contempler le delta de Kamokuna entier. La zone d'épanchement de magma en bordure d'océan se distingue très bien. On remarque l'une des routes du parc national des volcans de Hawaii, dont un tronçon a été recouvert par la coulée.

D'UNE BULLE AUX CHEVEUX DE PELE

La lave pāhoehoe chemine jusqu'à la mer à l'intérieur de tubes, sorte de plomberie volcanique. L'effondrement partiel du delta produit des fronts où débouchent ces tubes *(voir les images des pages suivantes).* Outre la vapeur formée quand la lave arrive au contact de la mer, il arrive que des vagues pénètrent dans les tubes, où une arrivée de magma vient recouvrir l'eau de mer encore froide. Instantanément vaporisée, celle-ci produit une bulle de lave qui éclate en crevant le plafond du tube. Ce phénomène, après refroidissement et solidification, produit de fins filaments que l'on nomme des « cheveux de Pele », du nom de la déesse hawaiienne des volcans, du feu et des éclairs.

VIE ET MORT D'UNE PLAGE

Prise depuis un hélicoptère le 30 juillet 2008, cette photo montre le delta de lave de Kamokuna érodé par les vagues : une plage de sable noir s'est formée. Des lignes de fracture traduisent la fragilité de cet édifice et annoncent son effondrement. L'absence de coulées en surface indique que la lave circule principalement au sein de tunnels. Seule une légère fumée bleue, visible en haut à droite, trahit la chaleur interne du delta. Peu visibles, des dépôts de soufre sont présents en plusieurs endroits. La photographie du bas montre la structure déjà à moitié effondrée, alors que de la roche en fusion continue à arriver. L'effondrement total de ce delta s'est produit le 31 décembre 2016, précipitant une surface de 11 hectares dans la mer.

© Jean-François Gonzalez

© Dirker/Shutterstock.com

© Toshi Saski/Getty Images

UN PIÈGE À TOURISTES

Le 25 février 2017, un effondrement partiel dans l'océan a mis au jour l'un des tunnels alimentant la coulée de lave à l'origine du delta de Kamokuna, sur le flanc du volcan Kilauea. L'écroulement du delta a créé une falaise, où le tunnel débouche à 28 mètres au-dessus du niveau de la mer. Dans l'océan, la roche en fusion produit des explosions hydrovolcaniques accompagnées de projections de « bombes » et de téphras (éjectas divers). Depuis le début de 2017, le phénomène devenu célèbre a attiré de nombreux touristes, qui se mettent en danger lorsqu'ils s'approchent à moins de 300 mètres de la zone active.

© Michel Detay

SUCCOMBER À L'APPEL DU VIDE

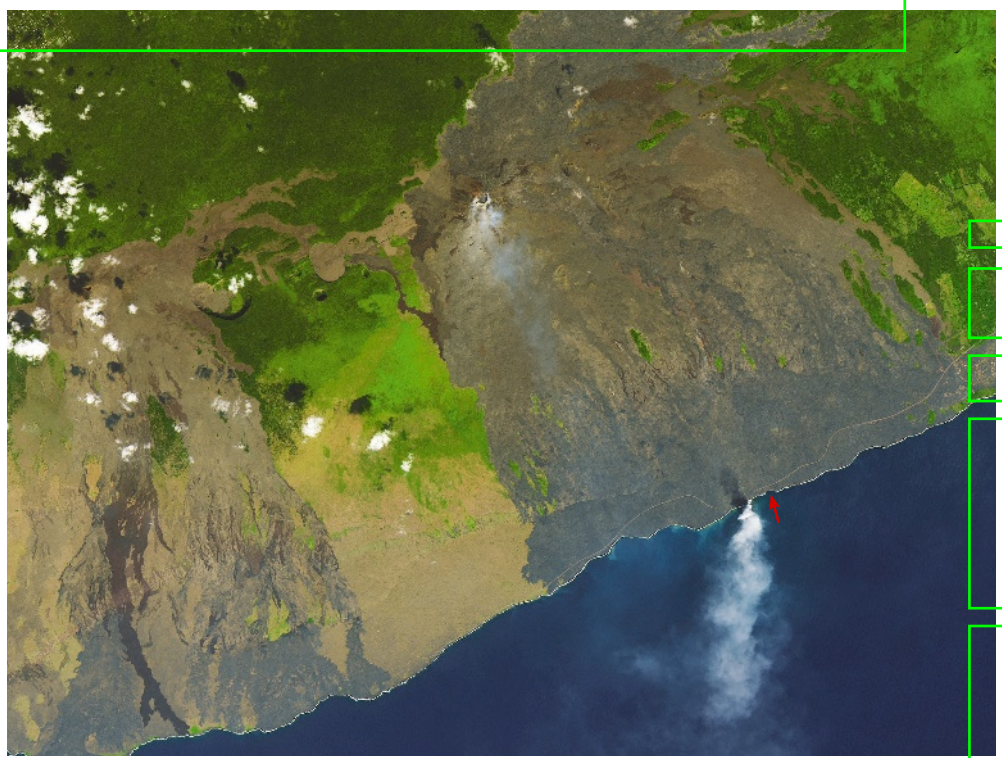
Prises le 25 février 2017 vers 9 heures du matin, depuis le haut de la falaise formant le nouveau trait de côte, les photographies ci-dessus montrent les manifestations hydrovolcaniques caractéristiques de l'arrivée d'une cascade de lave directement dans la mer. Ainsi, les explosions engendrées par le contact du magma avec l'eau créent de nombreux jets de cendres, de téphras et de bombes volcaniques. Les deux autres clichés pris respectivement le 21 février *(ci-contre)* et le 6 mars *(ci-dessous)* montrent des détails des cascades de lave, que les volcanologues américains nomment *fire hoses* (« tuyaux de feu »). La photographie ci-dessous, par exemple, a saisi les figures caractéristiques créées par la dislocation de la lave, due à l'appel du vide lors de sa sortie à l'air libre.

© Michel Detay

©USGS

UN TRAIT DE CÔTE ALÉATOIRE

Le 3 janvier 2017, l'imageur OLI (Operational Land Imager) du satellite *Landsat 8* révéla le nouveau trait de côte créé par l'effondrement du delta de lave de Kamokuna *(ci-dessous)*, indiqué par une flèche rouge. Non loin, une nouvelle coulée se signale par un panache de vapeur. L'ensemble de la côte est marqué par des effondrements successifs reconnaissables à leurs formes en arc de cercle. Ci-dessus, la même côte en voie de transformation prise en novembre 2017, c'est-à-dire avant que la période de dislocation ne débute.



©Nasa

BIBLIOGRAPHIE

M. DETAY, *Traité de volcanologie physique*, Lavoisier, 2017.

M. ET A.-M. DETAY, *Volcans. Du feu et de l'eau*, Belin, 2013.

G. MARIE, Processus préparant la construction et l'érosion des deltas de lave formés par les coulées du volcan Kilauea (Pu'u 'O'o-Kupaianaha, Hawaï), *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, vol. 12(2), pp. 75-90, 2006.

T. N. MATTOX ET M. T. MANGAN, Littoral hydrovolcanic explosions: A case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 75, pp. 1-17, 1997.

L'ESSENTIEL

- La plupart des bassins maritimes sont exposés aux tsunamis. Pourtant, les systèmes d'alerte ne sont pas complètement fonctionnels.
- Pour les améliorer, des réseaux de capteurs sont étendus, et les chaînes d'alerte, jusqu'aux populations, réorganisées.
- De nouveaux dispositifs de mesure ainsi que des modélisations aident également à mieux comprendre le phénomène.
- Des initiatives pour mieux sensibiliser les autorités locales et les populations sont aussi indispensables.

LES AUTEURS

FRANÇOIS SCHINDELÉ
est géophysicien, expert des systèmes d'alerte aux tsunamis au CEA et coordonnateur du Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT).

HÉLÈNE HÉBERT
est géophysicienne experte sur les tsunamis au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Tsunamis : les leçons du passé

Les catastrophes de Sumatra en 2004 et du Japon en 2011 ont révélé les lacunes des systèmes d'alerte. Beaucoup d'efforts sont aujourd'hui déployés pour y remédier. Est-ce suffisant ?

Le 30 octobre 2020, quelque part entre Izmir, en Turquie, et Samos, en Grèce, les réseaux sismologiques détectent un fort séisme de magnitude 7. Rapidement informés, les centres d'alerte aux tsunamis turc, grec et italien sonnent l'alarme en moins de 15 minutes. Les vagues de 1 à 3 mètres de hauteur créées par le séisme inonderont finalement plusieurs ports et villes balnéaires dans les quelques dizaines de minutes qui ont suivi le tremblement de terre. Bilan : pas de victime, mais des dégâts matériels souvent impressionnants. L'alerte a été émise par les centres d'alerte, mais la population n'a pas été prévenue.

© Shutterstock.com/Fly_and_Dive

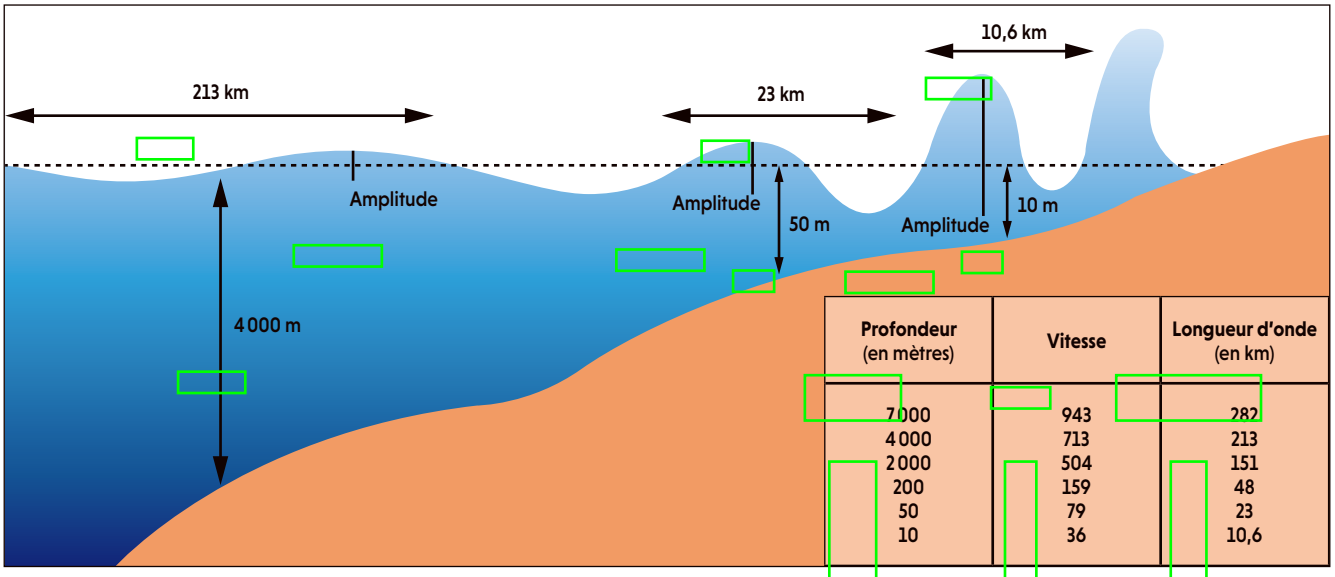
C'est que depuis les tsunamis catastrophiques de Sumatra, en Indonésie, en 2004 (235 000 victimes) et du Tōhoku, au Japon, en 2011 (16 000 victimes et une crise nucléaire majeure), ce phénomène est scruté avec beaucoup plus d'attention, y compris dans la région euroméditerranéenne. À raison, puisque la NOAA (pour National oceanic and atmospheric administration) recense dans le monde 273 « événements tsunamis » depuis le seul début du XXIe siècle, dont une quinzaine en Méditerranée. Quels progrès ont été faits dans la compréhension du phénomène, les dispositifs de détection et les systèmes d'alerte pour *in fine* protéger les populations ? N'y a-t-il pas quelques maillons faibles nécessitant d'être renforcés ?

LA VAGUE DU PORT

Les tsunamis sont historiquement bien connus dans le Pacifique, au Japon en premier lieu, d'où provient le terme « tsunami » signifiant « vague du port ». À l'origine, un phénomène géologique, comme un séisme ou une éruption volcanique, entraîne une déformation verticale du plancher océanique très étendue spatialement, jusqu'à des dizaines de milliers de kilomètres carrés, qui se répercute sur les eaux situées au-dessus. En 2004 et 2011, les séismes (de magnitude supérieure à 9) à l'origine des tsunamis résultaient d'un mouvement de subduction, où une plaque tectonique passe en dessous d'une autre. Au retour à l'équilibre après la secousse, des ondes se propagent dans toutes les directions.

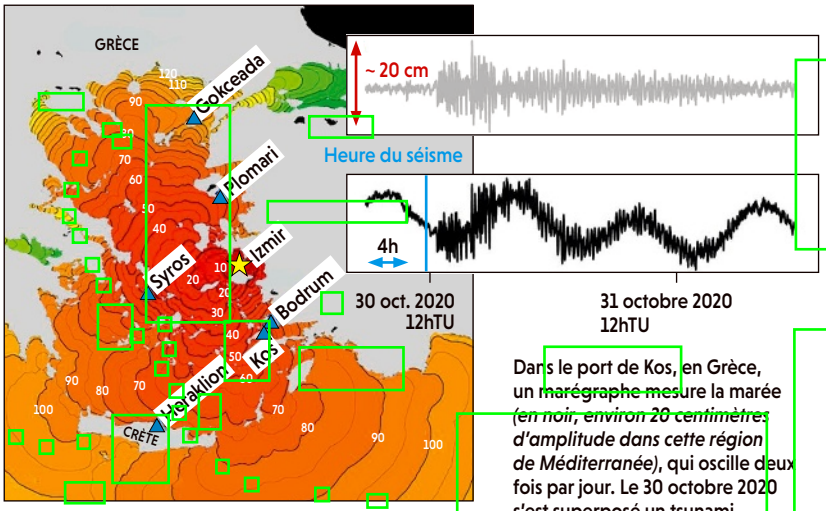
Imperceptible au large, le tsunami s'amplifie (l'amplitude des vagues, c'est-à-dire leur hauteur, augmente) en se rapprochant des côtes (*voir la figure page suivante, en haut*) où il est détecté par des marégraphes, des instruments qui restituent la hauteur du niveau d'eau au cours du temps. Dans le cas du tsunami du 30 octobre 2020, des ondes de plus de 20 centimètres d'amplitude ont produit des courants forts et des tourbillons perturbant le fonctionnement des ports. En 2004 et en 2011, les amplitudes sur ces instruments ont dépassé plusieurs mètres… Ces instruments, historiques dans la surveillance des tsunamis, ont à la faveur des événements récents révélé certains aspects du phénomène jusqu'alors insoupçonnés, par exemple sa très longue durée dans les ports (*voir la figure page suivante, en bas*), où généralement le retour à la normale peut prendre plus de 24 heures.

Toutefois, la nouveauté tient surtout à la multiplication des moyens de mesure à l'extérieur des ports. Des capteurs installés au fond des océans, loin des côtes, mesurent désormais la variation de la pression hydrostatique au passage des ondes. Sensibles à des amplitudes de quelques centimètres seulement, ces >



Profondeur (en mètres)	Vitesse	Longueur d'onde (en km)
7 000	943	282
4 000	713	213
2 000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10,6

Un tsunami est un train d'ondes qui met en mouvement toute la colonne d'eau, du fond à la surface et transportant beaucoup d'énergie. À grande profondeur, les vaguesse propagent à grande vitesse, ont une grande longueur d'onde et une faible amplitude. En se rapprochant des côtes, la profondeur diminue entraînant un ralentissement de l'onde, la diminution de sa longueur d'onde et son amplification jusqu'au déferlement.



Dans le port de Kos, en Grèce, un marégraphe mesure la marée *(en noir, environ 20 centimètres d'amplitude dans cette région de Méditerranée)*, qui oscille deux fois par jour. Le 30 octobre 2020 s'est superposé un tsunami (né d'un séisme de magnitude 7 au large d'Izmir, en Turquie) dont on peut isoler le signal *(en gris)*. Son oscillation là aussi d'environ 20 centimètres d'amplitude s'atténue au cours du temps, mais dure au moins 24 heures.

> «tsunamimètres» sont cruciaux pour suivre la propagation du tsunami et anticiper ses impacts. Citons aussi des bouées associées à un «système de positionnement par satellite» (les bouées dites GNSS, pour géolocalisation et navigation par un système de satellites), qui mesurent précisément les oscillations de la mer.

Ces instruments innovants ont mis en lumière la complexité des tsunamis. Ainsi, l'analyse des données des capteurs de pression a montré la dispersion spectaculaire des tsunamis, c'est-à-dire le fait que les ondes les plus courtes du tsunami arrivent bien plus tard que celles de plus grandes longueurs d'onde.

En complément des mesures physiques de plus en plus détaillées et précises, mais souvent trop rares, des enquêtes de terrain sont riches d'informations. Ainsi, après le tsunami d'octobre 2020 en mer Égée, grâce aux témoignages des habitants et à quelques vidéos complétant les mesures, les experts ont eu accès à plusieurs informations importantes. À quelle heure est arrivée la première vague? Y a-t-il eu un retrait de la mer auparavant? Combien de vagues se sont succédé? Quelle est la période, c'est-à-dire le temps écoulé entre deux vagues? Quelle fut la hauteur de vague maximale? Plus encore, ils accèdent aux paramètres de référence d'un tsunami: le *run-up* (l'altitude maximale de déferlement), la profondeur maximale d'inondation et les lieux les plus impactés.

Avec tous ces éléments, les spécialistes repèrent les sites (baies, ports...) plus sensibles au tsunami que d'autres, identifient les zones à évacuer en priorité et au final renforcent et affinent les systèmes d'alerte.

ALERTE AU TSUNAMI

En Méditerranée, les premiers systèmes d'alerte ont été établis à partir de 2005, et, depuis, six événements sur des failles peu connues ont impacté les côtes grecques, italiennes et turques. Sans les réseaux de surveillance et ce système d'alerte, ces tsunamis seraient passés inaperçus. Le risque de tsunami en Méditerranée est ainsi mieux évalué aujourd'hui, mais l'alerte aux populations n'est pas encore complètement fonctionnelle. Pour quelles raisons? La question est cruciale au cas où un tsunami catastrophique comme celui de l'an 365 en Crète venait à se produire aujourd'hui, menaçant de dévaster tout l'est de la Méditerranée avec des impacts autrement plus dévastateurs qu'au IVe siècle.

La mise en place de l'alerte descendante, des centres d'alerte jusqu'au grand public en

© IOC-UNESCO

passant par les autorités régionales et communales, prend du temps et nécessite des décisions politiques fortes, des arrêtés, la mise en place d'un plan Orsec (pour Organisation des secours)… et implique de nombreuses personnes. Or beaucoup de ces maillons, dont une partie des autorités, ne s'attendent pas à être confrontés à des tsunamis en Méditerranée, ignorant qu'il y en a eu par le passé. Ce manque cruel de sensibilisation met du temps à être comblé, mais la situation s'améliore.

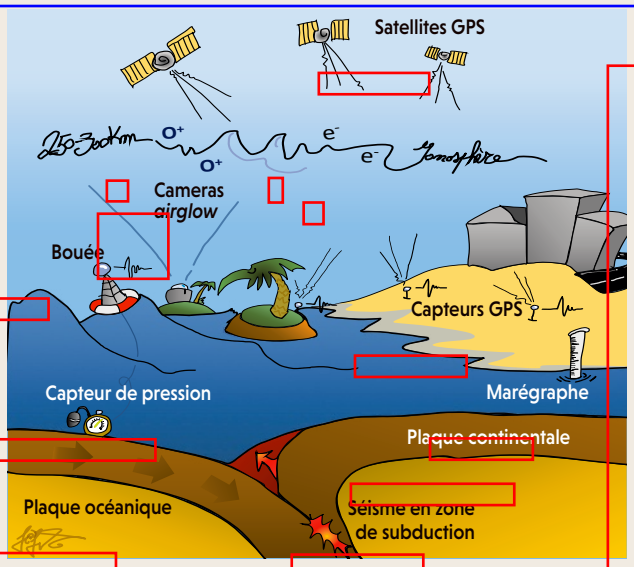
Jusqu'en 2004, seul l'océan Pacifique était couvert par un système d'alerte, coordonné par un groupe intergouvernemental de coordination (GIC) établi par la commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'Unesco en 1965, et visant à alerter les États en cas de séisme majeur, source d'un éventuel tsunami. Après la catastrophe de Sumatra, en 2004, déclenchée par un séisme exceptionnel de magnitude 9, la COI a établi dès juin 2005 trois nouveaux GIC, pour couvrir l'océan indien, les Antilles, l'Atlantique nord-est, la Méditerranée et les mers adjacentes, ainsi qu'un groupe mondial. Ces GIC définissent l'architecture des systèmes d'alerte, les mettent en place et incitent tous les États membres à y contribuer.

Les avancées majeures concernent la gouvernance et la chaîne d'alerte. La plupart des pays ont nommé des organismes chargés de recevoir les alertes et de les transmettre aux autorités de sécurité civile. En France, le Centre national d'alerte aux tsunamis (Cenalt), qui couvre >

LES TSUNAMIS VUS DU CIEL

Pour mieux être en mesure d'alerter les populations à temps, les tsunamis nécessitent d'être surveillés par des réseaux de capteurs de plus en plus denses. Pour compléter les techniques classiques d'observation et d'estimation du risque, une nouvelle discipline est née à l'institut de physique du globe de Paris: la sismologie ionosphérique. Cette nouvelle branche de la sismologie se base sur l'observation des perturbations générées par les séismes et les tsunamis dans l'ionosphère, la haute partie de l'atmosphère terrestre entre 80 et 1000 kilomètres d'altitude où, sous l'effet des radiations solaires, les molécules neutres sont partiellement ionisées et forment un plasma d'ions et d'électrons.

Lors de forts séismes, le déplacement vertical de l'eau au niveau de l'épicentre ou à grande distance par la propagation du tsunami, crée des ondes de gravito-acoustiques, c'est-à-dire un mélange d'ondes acoustiques et d'ondes de gravité. Ces dernières se distinguent premières en ce qu'elles sont produites par le déplacement d'une masse, sans compression. À mesure qu'elles s'élèvent dans l'atmosphère, toutes ces ondes sont fortement amplifiées par la diminution de la densité de l'air. Leur interaction avec l'ionosphère provoque de fortes variations de la vitesse et de la densité du plasma, observables par diverses techniques. Par exemple, on peut utiliser le contenu électronique total (TEC), c'est-à-dire le nombre d'électrons rencontrés par le signal échangé entre un récepteur et un satellite GPS, ou bien par des caméras dites *airglow* mesurant la densité ions O^+ estimée en mesurant le nombre de photons produits par la recombinaison de l'oxygène à grande altitude. On accède ainsi à la signature du tsunami sur une extension spatiale jamais atteinte par des capteurs ponctuels dans l'océan.



Le suivi des événements de Sumatra, en Indonésie, en 2004, et de Tōhoku, au Japon, en 2011, a validé le principe du sondage ionosphérique pour visualiser la genèse (seulement 8 minutes après la rupture) et la propagation du tsunami (dès 40 minutes après la rupture) dans les régions océaniques non couvertes par d'autres capteurs. On a évalué le potentiel tsunamigénique de la rupture sismique et estimé l'amplitude du tsunami avec une précision encourageante. En 2018, nous avons proposé de définir une nouvelle magnitude, la «magnitude ionosphérique» afin de quantifier une observation sismologique par l'observation de l'ionosphère. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives: avec le soutien du Cnes, nous envisageons d'embarquer une caméra *airglow* sur un satellite pour couvrir l'ensemble des océans et compléter les instruments déployés au sol ou en mer.

GIOVANNI OCCHIPINTI
chercheur à l'institut de physique du globe de Paris.

> l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale, est l'un des onze centres d'alerte aux tsunamis au niveau international. Le Japon est un exemple dont on peut tirer quelques enseignements.

LES LEÇONS DU JAPON

Le 11 mars 2011, un tsunami a dévasté toutes les villes portuaires du nord-est de l'archipel, et gravement endommagé la centrale nucléaire de Fukushima, où la menace avait été sous-évaluée. Mais le tsunami a causé beaucoup moins de victimes qu'en 2004, illustrant le bon fonctionnement d'un système développé dès les années 1950, capable de détecter rapidement le séisme, d'évaluer le tsunami et d'alerter des populations bien entraînées à ce risque.

En particulier, les capteurs de pression immergés et les bouées GNSS en surface ont repéré très précisément le tsunami une vingtaine de minutes après le séisme (*voir la figure page suivante*). L'amplitude de plusieurs mètres des vagues au large, un record, a conduit à augmenter le niveau d'alerte sous-estimé dans un

DES TSUNAMIS VOLCANIQUES

Au soir du 22 décembre 2018 le volcan Anak Krakatau (voisin du Krakatau), en Indonésie, crache de la lave visible depuis les plages de Java, à 40 kilomètres. Soudain, vers 21 heures, un panache de cendres obscurcit le ciel. Et une demi-heure plus tard, des vagues de plusieurs mètres de hauteur dévastent les côtes de Java, puis de Sumatra, faisant plus de 430 victimes. Des centaines de maisons et de bateaux sont détruits. Les études ont depuis montré que le volcan avait été biseauté par un glissement de terrain de plus de 150 millions de mètres cubes de roches, dont l'entrée en mer a provoqué le tsunami.

Ces tsunamis dits «volcaniques», moins fréquents que leurs homologues sismiques, représentent un défi, car les centres d'alerte ne les prennent pas en compte. De plus, les observatoires volcanologiques sont rarement équipés pour surveiller la formation de vagues inhabituelles autour des volcans. Enfin les autorités et les populations locales ne sont pas sensibilisées à ce risque. Autant de facteurs qui accentuent la dangerosité de ce type de tsunamis.

Le Stromboli, en Italie, juste avant le glissement de terrain du 30 décembre 2002.

Ils ne sont pourtant pas inconnus. Un seul exemple, en août 1883, une éruption cataclysmique du Krakatau a engendré des tsunamis pendant plusieurs jours. Au paroxysme, le panache de cendres et de roches s'élevant à plus de 40 kilomètres d'altitude s'est écroulé sur lui-même, provoquant un tsunami de 15 mètres sur les côtes du détroit de la Sonde. Bilan: 30 000 morts.

Les écoulements au sens large sont responsables de la majorité des tsunamis volcaniques. Lors de l'entrée dans l'eau, le transfert d'énergie produit une vague d'impulsion suivie de vagues secondaires. Cette vague initiale atteint parfois plusieurs centaines de mètres de hauteur dans le cas de mégaglissements d'îles océaniques.

La différence principale entre les vagues générées par les glissements de terrain et celles dues à des séismes se situe à la source: les premières sont caractérisées par une forte amplitude initiale avec des longueurs d'onde modestes. La conséquence est un impact plus localisé.

D'autres mécanismes sont possibles, notamment dans le cas des volcans immergés. Lorsque le magma entre en contact avec l'eau à faible profondeur, des explosions percent parfois la surface de l'eau, formant un «cratère» qui ensuite se soulève puis s'effondre. Les vagues formées se propagent de façon radiale autour de l'explosion. Un tel phénomène a été observé en 1996 dans le lac Karymsky, en Russie. Les effondrements de caldeiras sous-marines sont aussi susceptibles de générer des tsunamis, mais il n'existe aucun cas avéré.

La compréhension des tsunamis liés à l'activité et l'instabilité des volcans a beaucoup progressé. Mais l'exemple de l'Anak Krakatau en 2018 pointe des lacunes en matière de prévention. Le tsunami généré par un effondrement du flanc nord du Stromboli en 2002 avait incité les Italiens à établir un dispositif de vigilance et d'alerte sur ce volcan qui figure déjà parmi les plus surveillés du monde. Deux balises flottantes équipées de capteurs de pression hydrostatique reliés à un système de positionnement par satellite sont venues compléter les nombreux équipements disposés sur le volcan: en 2019, ils ont enregistré les deux tsunamis induits par des écoulements.

RAPHAËL PARIS
chercheur au laboratoire Magmas et volcans, à l'université Clermont-Auvergne.

© J. Fuchs

premier temps par les données sismiques. Ces données en mer, indispensables, ont poussé les autorités japonaises à intensifier, depuis 2011, leurs investissements dans des systèmes de câbles sous-marins de plusieurs milliers de kilomètres, déployés près des zones de subduction, équipés de plus de 200 capteurs sismiques et capteurs de pression.

À terre aussi, la densité des réseaux sismiques et de capteurs GNSS permet au Japon d'être très performant sur l'alerte précoce. Couplées aux données en mer, ces observations aident à caractériser très rapidement le séisme et l'amplitude du tsunami.

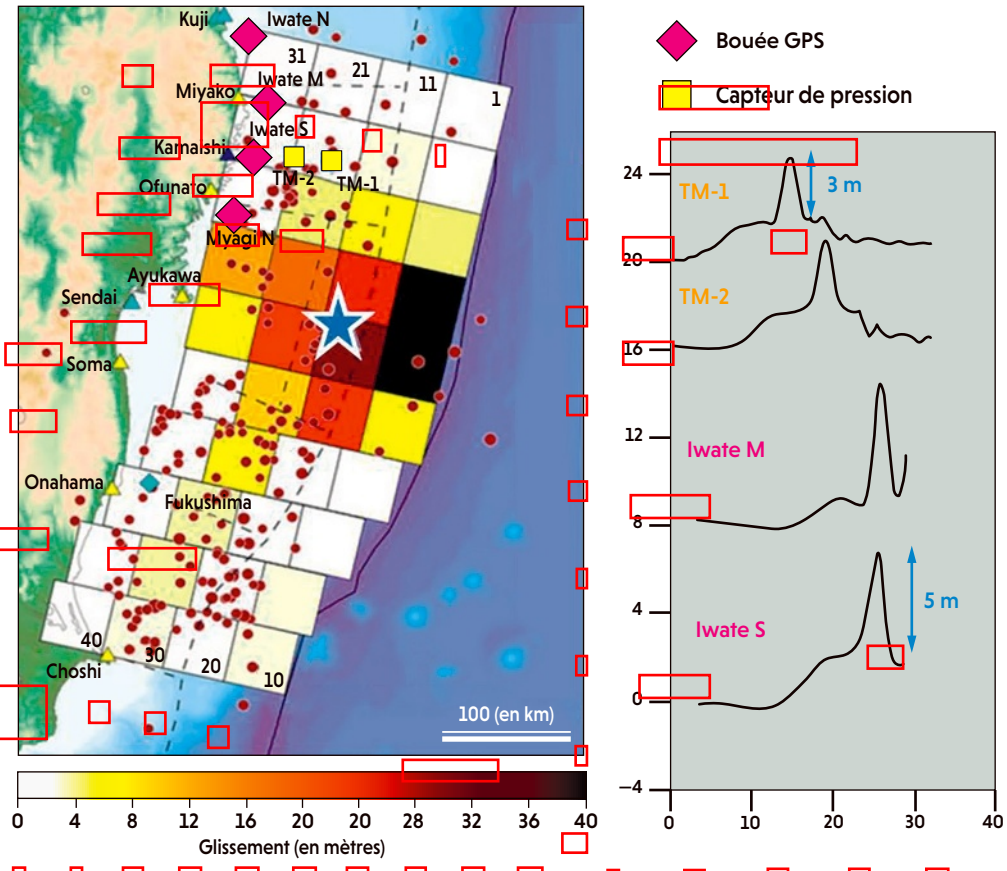
D'ici peu, les centres d'alerte, au Japon et ailleurs, recevront des informations supplémentaires recueillies dans les plus hautes couches de l'atmosphère (*voir l'encadré page 37*). Des mesures satellitaires contribueront également à cerner rapidement la nature des déformations de la croûte terrestre. Ensemble, ces nouveaux jeux de données apporteront dans la prochaine décennie une meilleure connaissance d'un tsunami en temps réel.

L'alerte aux tsunamis reste néanmoins un défi lorsqu'ils sont provoqués par des éruptions volcaniques ou des glissements de terrain (*voir l'encadré page ci-contre*). Certains volcans sont désormais dotés de systèmes locaux de détection, notamment le Stromboli, en Italie, depuis un tsunami important en 2002. Mais équiper l'ensemble des volcans menaçants est très coûteux au regard de la rareté des tsunamis atypiques qu'ils génèrent. Le système d'alerte de la Caraïbe a néanmoins émis des recommandations pour intégrer les sources volcaniques dans les procédures d'alerte, en lien avec les observatoires volcanologiques.

Les trois piliers indispensables des systèmes d'alerte sont toujours : l'évaluation de l'aléa et du risque ; la surveillance et l'alerte ; la prévention. Si les initiatives internationales ont contribué à renforcer chacun de ces piliers depuis 2004, la réussite nécessite, nous l'avons vu, des efforts permanents aux échelles locales de décision et de préparation. Des progrès sont aussi attendus du côté de la modélisation.

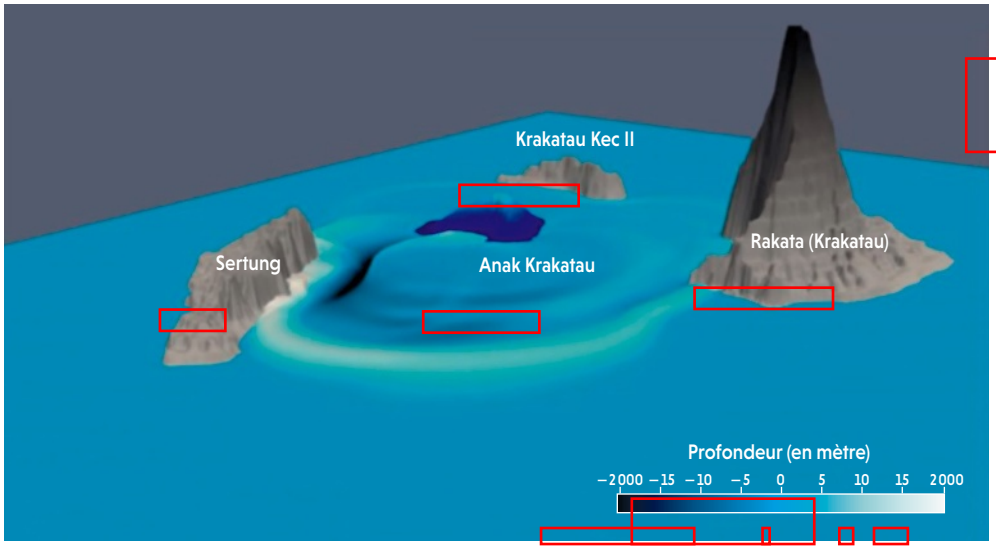
L'AIDE DES MODÈLES

De fait, les simulations numériques des tsunamis s'améliorent notablement. Elles livrent des modèles toujours plus précis et rapides, reproduisant par exemple des tsunamis historiques ou récents (*voir la figure page suivante*). Les spécialistes peuvent aussi les comparer à des données marégraphiques et se projeter dans des scénarios futurs. Les modélisations, menées en cours d'alerte, sont également de plus en plus utilisées pour prévoir les effets à distance dès qu'un séisme tsunamigénique se >



Le tsunami du 11 mars 2011, au Japon, a été détecté dans les dizaines de minutes qui ont suivi le séisme, d'abord par des capteurs de pression au fond de la mer *(TM-1 et TM-2)*, puis par les bouées équipées de capteur GPS plus près des côtes *(Iwate M et S)*. Les signaux révèlent comment l'amplitude du tsunami augmente en s'approchant de la côte. À gauche, le long de la zone de subduction, les données géophysiques donnent un aperçu du glissement le long de la faille, pendant le séisme, atteignant localement 40 mètres.

© Y. Fujii et al. et H. Tsushima et al.



Une simulation du tsunami né de l'effondrement du volcan indonésien Anak Krakatau en décembre 2018.

produit : c'est le cas aujourd'hui pour les tsunamis surveillés par le laboratoire de géophysique de Polynésie française.

Pour de bonnes performances, certaines données sont indispensables, comme la profondeur d'eau en tout point du domaine étudié et les caractéristiques physiques précises des sources, qu'il s'agisse d'un effondrement ou d'un séisme. Grâce à elles, on peut modéliser précisément les zones côtières exposées à des inondations et définir les zones d'évacuation et de refuge.

Les modèles apportent des éléments pour que les autorités des littoraux, de plus en plus exposés sur le plan démographique ou économique, et dans un contexte de montée du niveau marin, puissent agir. Avec l'appui des modèles, la préparation passe également par l'éducation, la sensibilisation et l'anticipation grâce à des exercices répétés.

Les hypothèses retenues dans les modèles doivent aussi refléter les connaissances interdisciplinaires, et aller au-delà des modèles consensuels. Ainsi, avant le séisme du Tōhoku du 11 mars 2011 (de magnitude 9,1), les modèles réalisés au Japon dans les années 1990 et 2000 n'envisageaient pas que la magnitude d'un séisme de subduction puisse atteindre 9. Pourtant, la découverte à cette même époque de dépôts anciens, dans les sols, montrait que seuls des séismes de magnitude 9 pouvaient expliquer des inondations extrêmes dans la plaine de Sendai (à 300 kilomètres au nord-est de Tokyo) au IXe siècle… De tels événements s'étaient manifestement déjà produits, mais n'avaient pas été pris en compte pour la prévention.

Plus généralement, les tsunamis de 2004 et 2011 imposent désormais de considérer toute subduction comme tsunamigénique. En outre, un système mondial d'alerte ne doit négliger aucune région. En dehors du Pacifique, nous avons vu que bien d'autres zones sont exposées, à commencer par la Méditerranée, touchée plusieurs fois par des événements majeurs : à la Crète en 365 que nous avons citée, ajoutons Alger en 1365, la Sicile et la Calabre en 1908… Et dans les régions moins documentées sur la durée, des événements sont connus, liés à une activité tectonique ou volcanique soutenue, comme celles de la montagne Pelée en 1902 ou de la République dominicaine, en 1946.

LE MONDE ENTIER À LA LOUPE

De nouvelles régions propices à l'aléa tsunami émergent également, comme le Groenland, où la montée des températures a favorisé en 2000 et 2017 deux glissements de terrain dans des fjords. Déclenchés à près de 1000 mètres d'altitude, ils ont entraîné des tsunamis qui ont détruit deux villages éloignés, faisant plusieurs victimes. L'activité tectonique et volcanique terrestre crée aussi de nouvelles zones à risques, comme à Mayotte (*voir l'entretien page 20*), où le volcan découvert en 2019 reste potentiellement tsunamigénique et mérite à ce titre d'être surveillé, sur un archipel exposé par ailleurs aux tsunamis de l'océan Indien.

Les progrès dans les technologies de mesure sont indéniables et améliorent la prévention. Cependant, des efforts restent à poursuivre pour déployer des capteurs, cartographier les failles sous-marines méconnues, et préparer les populations et autorités de manière optimale. Comme toujours dans la prévention des risques, les investissements à réaliser sont à comparer aux coûts induits lorsque les catastrophes surviennent et que les scientifiques reviennent pour rappeler qu'un tsunami majeur était prévisible. La décennie qui s'ouvre, dédiée par les Nations unies aux sciences océaniques au service du développement durable, devrait inciter à des études d'aléa et de risque dans toutes les zones potentiellement exposées, et à renforcer significativement l'ensemble des moyens d'observation, de surveillance et d'alerte. ■

Les auteurs remercient AUDREY GAILLER et PHILIPPE HEINRICH, du CEA, pour leur contribution à cet article

BIBLIOGRAPHIE

F. MANTA *ET AL.*, Rapid identification of tsunamigenic earthquakes using GNSS ionospheric sounding, *Scientific Reports*, vol. 10, art. 11054, 2020.

H. HÉBERT *ET AL.*, Contributions of space missions to better tsunami science : observations, models and warnings, *Surveys in Geophys.*, vol. 41, pp. 1535–1581, 2020.

A. PARIS *ET AL.*, The December 22, 2018 Anak Krakatau, Indonesia, landslide and tsunami: preliminary modeling and results, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 177, pp. 571-590 2020.

F. SCHINDELÉ *ET AL.*, Implementation and challenges of the Tsunami Warning System in the Western Mediterranean, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 172, pp. 821-833, 2015.

A. JAMELOT ET D. REYMOND, New tsunami forecast tolls for the French Polynesia Tsunami Warning System Part II: numerical modelling and tsunami height estimation, *Pageoph*, vol. 172, pp. 805-819, 2015.

R. PARIS, Source mechanisms of volcanic tsunamis, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, art. 20140380, 2015.

© R. Paris et al., 2021

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	31 % de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement Pour La Science - 56 rue du Rocher - 75008 Paris - serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG21STDDOS

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

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

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — 6,50€ PAR MOIS -31 %
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

PPV6E50

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — 8,20€ PAR MOIS -43 %
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
E-mail : ..... @ .....
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Mandat de prélèvement SEPA

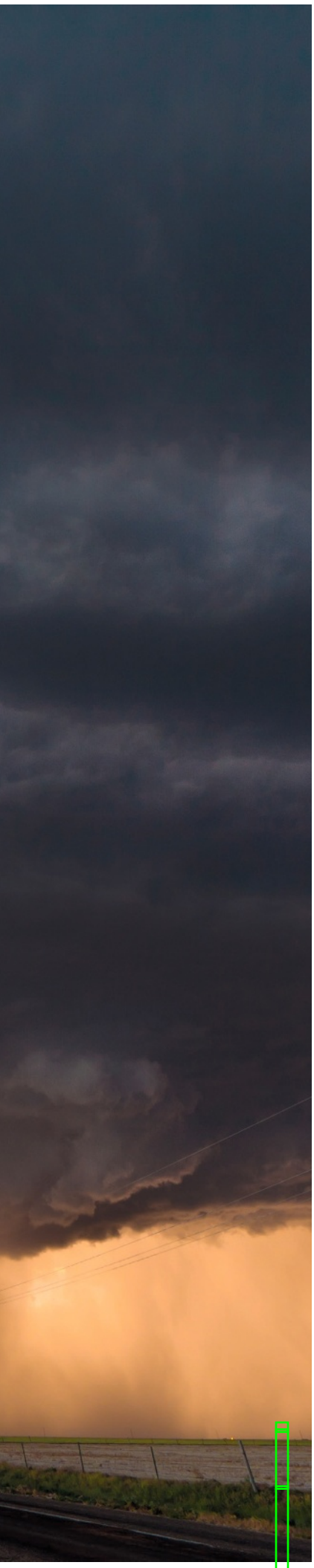
En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte
Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Un gigantesque orage dit « supercellulaire » se prépare au-dessus des grandes plaines des États-Unis.



© Shutterstock.com/Minerva Studio

À L'HEURE DE L'ANTHROPOCÈNE

Le fait est incontestable : l'atmosphère se réchauffe et les activités humaines en sont la principale cause. Les températures augmentent en moyenne de deux dixièmes de degré par décennie, bouleversant le climat et influant sur les événements météorologiques extrêmes. Ainsi les cyclones s'intensifient et se font plus destructeurs. Tandis que la sécheresse s'installe, même dans des régions tempérées, et que les pics de chaleur se multiplient, augmentant le nombre de mégafeux. Et au moment où, sur notre territoire, une Méditerranée plus chaude favorise les épisodes de pluies torrentielles et les crues qui les accompagnent. Sommes-nous condamnés à rester impuissants ?

L'ESSENTIEL

- Quand le jet-stream, ce faisceau de vents violents à haute altitude, perd sa forme rectiligne et se met à onduler, il provoque à la fois des pluies torrentielles et des canicules propices aux incendies.
- Si jamais il se fige dans cette configuration, le mauvais temps s'installe durablement.
- Les mathématiques issues de la mécanique quantique expliquent comment des résonances dans l'atmosphère amplifient les ondulations et aggravent encore la météo.
- Avec le réchauffement climatique, on prévoit que ce phénomène s'amplifiera à partir des années 2050.

L'AUTEUR

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

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

Le jet-stream, amplificateur météorologique

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

Ces quinze dernières années, une longue litanie d'événements climatiques extrêmes a frappé le monde en été. En 2003, l'Europe a connu une vague de chaleur inédite, qui a fait 30000 victimes. En 2010, des feux de forêt en Russie et des inondations au Pakistan ont causé des dégâts et un nombre de morts sans précédent. Un an plus tard, sous l'effet de la chaleur et de la sécheresse, les *ranchers* de l'État d'Oklahoma perdaient la moitié de leur bétail. Les feux de forêt de 2016 en Alberta ont constitué la catastrophe la plus coûteuse de l'histoire du Canada. Et l'été 2018 a été tristement célèbre aux États-Unis : des températures dépassant 37 °C ont été durablement atteintes dans le sud-ouest, des pluies abondantes et des crues ont frappé durement le nord-est du pays et la Californie a subi de terribles incendies. Le même été, des calamités météorologiques du même type ravageaient l'Europe et l'Asie.

Ces catastrophes à répétition, alors que la Terre se réchauffe, sont-elles une coïncidence ? Mes collègues et moi pensons que non. Tous ces événements ont un point commun : ils se sont déroulés pendant que le jet-stream présentait une forme inhabituelle.

Le jet-stream (ou courant-jet) est un courant de vents violents qui soufflent d'ouest en est et font le tour de l'hémisphère Nord à une latitude moyenne d'environ 60°. Le jet-stream chemine parfois en ligne à peu près droite (lorsqu'on trace sa trajectoire sur un planisphère), mais il peut aussi onduler (il forme des vagues qui se déplacent). Par exemple, il peut traverser l'Amérique du Nord d'abord en remontant de l'océan Pacifique vers l'ouest du Canada, puis descendre vers le sud jusqu'au Midwest américain avant de repartir au nord vers Terre-Neuve. Cette traversée en forme de S couché apporte de l'air chaud au nord et de l'air frais au sud et déverse sur les territoires de la pluie ou de la neige, en particulier au niveau des inflexions du S. Ainsi, le jet-stream contrôle la météorologie des latitudes moyennes.

Durant les événements extrêmes que nous avons mentionnés, le jet-stream s'est étrangement comporté. Ses coudes se sont aventurés loin au nord et au sud. Or plus ces sinuosités sont amples, plus les conditions climatiques s'aggravent sous les pics et les creux du S couché. Et si en plus elles se figent, comme cela a >

© Josh Edelson/Getty Images

été le cas durant l'été 2018, les bulletins météo quotidiens se répètent, n'annonçant que pluies diluviennes ou canicules. Inondations record, sécheresses et feux de forêt surviennent alors.

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

D'où tirons-nous ces prévisions? De la théorie des ondes et de la mécanique quantique. Oui, les mathématiques qui décrivent le comportement des électrons à petite échelle nous aident à dessiner le futur de l'atmosphère aux échelles globales. Elles indiquent que la multiplication des événements extrêmes, le plateau à venir et la nouvelle intensification qui s'ensuivra sont pilotés par un étrange compromis entre les concentrations de gaz à effet de serre provenant de combustibles fossiles brûlés et la pollution par le soufre provenant des cheminées industrielles. Elles soulèvent aussi la question de savoir si la réduction des émissions empêchera bien le jet-stream de causer des ravages, ce qui est loin d'être une certitude…

LES ONDES DE ROSSBY

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

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

SI LE JET-STREAM EST AFFAIBLI, SES SINUOSITÉS PEUVENT CALER, D'OÙ DES SITUATIONS DE BLOCAGE

Mais pourquoi ces lacets se forment-ils qu'en certains endroits? Le jet-stream est en réalité influencé par une série de larges ondes qui circulent dans l'atmosphère, créées naturellement par la rotation de la Terre dans l'air. Il s'agit des ondes de Rossby, du nom du météorologue suédo-américain Carl-Gustaf Rossby, le premier à expliquer dans les années 1930 la physique à grande échelle de l'atmosphère. Ces ondes existent aussi dans les océans.

Les ondes de Rossby atmosphériques s'étendent sur des centaines de kilomètres et se meuvent d'ouest en est dans l'hémisphère Nord. Quand la différence de température entre les masses d'air décroît en été, elles ont tendance à se déformer et leur migration vers l'est ralentit. En toute saison, le jet-stream adopte la forme et la trajectoire des ondes de Rossby.

D'autres ondes se propagent à travers l'atmosphère et les océans. Par exemple, des ondes de gravité naissent d'une perturbation temporaire entre la gravité, qui tire l'atmosphère vers le bas, et d'autres forces qui la poussent vers le haut, comme quand une montagne fait s'élever les vents incidents. Parmi ces ondes, celles dites « de Kelvin » se produisent dans le Pacifique dans un couloir étroit situé à cheval sur l'équateur. Elles y voyagent d'ouest en est, réchauffent et refroidissent à intervalles réguliers les eaux de surface, et constituent un ingrédient essentiel du phénomène climatique El Niño.

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

UN FACTEUR D'AGGRAVATION

Les événements météorologiques extrêmes surviennent majoritairement quand les boucles des ondes de Rossby, et donc celles du jet-stream, sont fortement amplifiées. En effet, les systèmes de haute et basse pression sont d'autant plus

En 2010, de graves inondations ont submergé la ville de Khairpur Nathan Shah, au Pakistan. Elles résulteraient d'un effet atmosphérique nommé « amplification quasi résonante » (AQR).

© Gideon Mendel/Getty Images

marqués que les crêtes et les creux s'éloignent de la trajectoire moyenne. Dans cette configuration où l'onde est stationnaire, le système de haute pression stagne. C'est ce qui a causé en juillet 2018 la canicule du sud-ouest des États-Unis et les inondations simultanées au nord-est du pays. Un autre exemple date de juillet 2010 en Asie: tandis qu'une crête se développait au-dessus de la Russie, engendrant records de chaleur, sécheresse et feux de forêt, plus en aval du S un creux se déployait au-dessus du Pakistan et a apporté des inondations historiques.

En temps normal, l'amplitude des ondes de Rossby est limitée par l'énergie qu'elles irradient lorsqu'elles s'étendent vers le nord et le sud, et à mesure de leur progression vers l'est. Cependant, l'atmosphère se comporte parfois comme un guide d'ondes. Imaginez une ligne d'axe est-ouest traversant le Canada en son centre et une autre parallèle qui passerait au sud des États-Unis. Une onde de Rossby sinueuse reste bloquée entre ces « murs » et perd peu d'énergie. Ce confinement verrouille le jet-stream et les puissants systèmes de haute et basse pression qui y sont liés.

Quand les ondes font du surplace, les boucles peuvent enfler. Ce phénomène, surtout estival, est une amplification quasi résonante (AQR). Il y a plusieurs années, Vladimir Petoukhov et ses collègues, à l'institut de Potsdam de recherche sur les effets du changement climatique, en Allemagne, ont montré que les conditions favorisant une AQR dépendaient de la forme du jet-stream. Or le réchauffement climatique aurait une influence sur la forme du jet-stream et donc sur l'AQR.

Pour comprendre pourquoi, il faut faire appel aux mêmes mathématiques développées au début du XX^{e} siècle pour résoudre certains problèmes en mécanique quantique. L'idée qu'il existe un lien entre la météorologie et ce champ de recherche qui semble très éloigné m'est particulièrement séduisante, sachant que j'ai entamé ma carrière comme physicien théoricien.

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

BULLETIN MÉTÉO QUANTIQUE

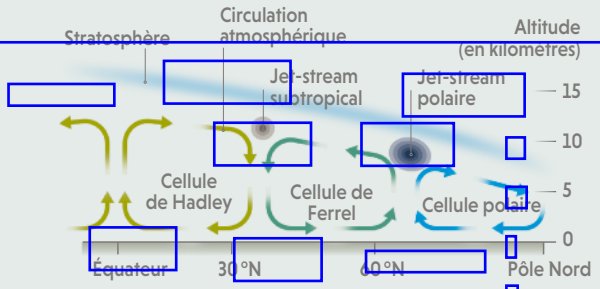
En mécanique quantique, les choses sont différentes. L'électron n'a pas de position bien définie : la probabilité de le trouver en un endroit donné est déterminée par l'équation de Schrödinger, une équation d'onde. Placé entre des murs de haute énergie, un électron a une probabilité de se trouver en chaque point de la boîte. Or cette probabilité est décrite par une courbe sinusoïdale, autrement dit par... un S couché.

Étonnamment, lorsque les murs de la boîte sont de hauteur (c'est-à-dire d'énergie) modeste, l'électron a une probabilité faible, mais non nulle, de traverser les parois. C'est l'« effet tunnel ». L'électron est ainsi majoritairement confiné à l'intérieur de la boîte, mais « fuite » un peu au niveau de chaque mur.

La physique à l'œuvre sur cet exemple à une dimension ressemble à ce qui se produit en trois dimensions dans le cas du guide d'ondes. On résout les équations décrivant ces objets >

LES CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES FIGÉES SUR PLACE

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



LE JET-STREAM S'ENROULE AUTOUR DE LA TERRE

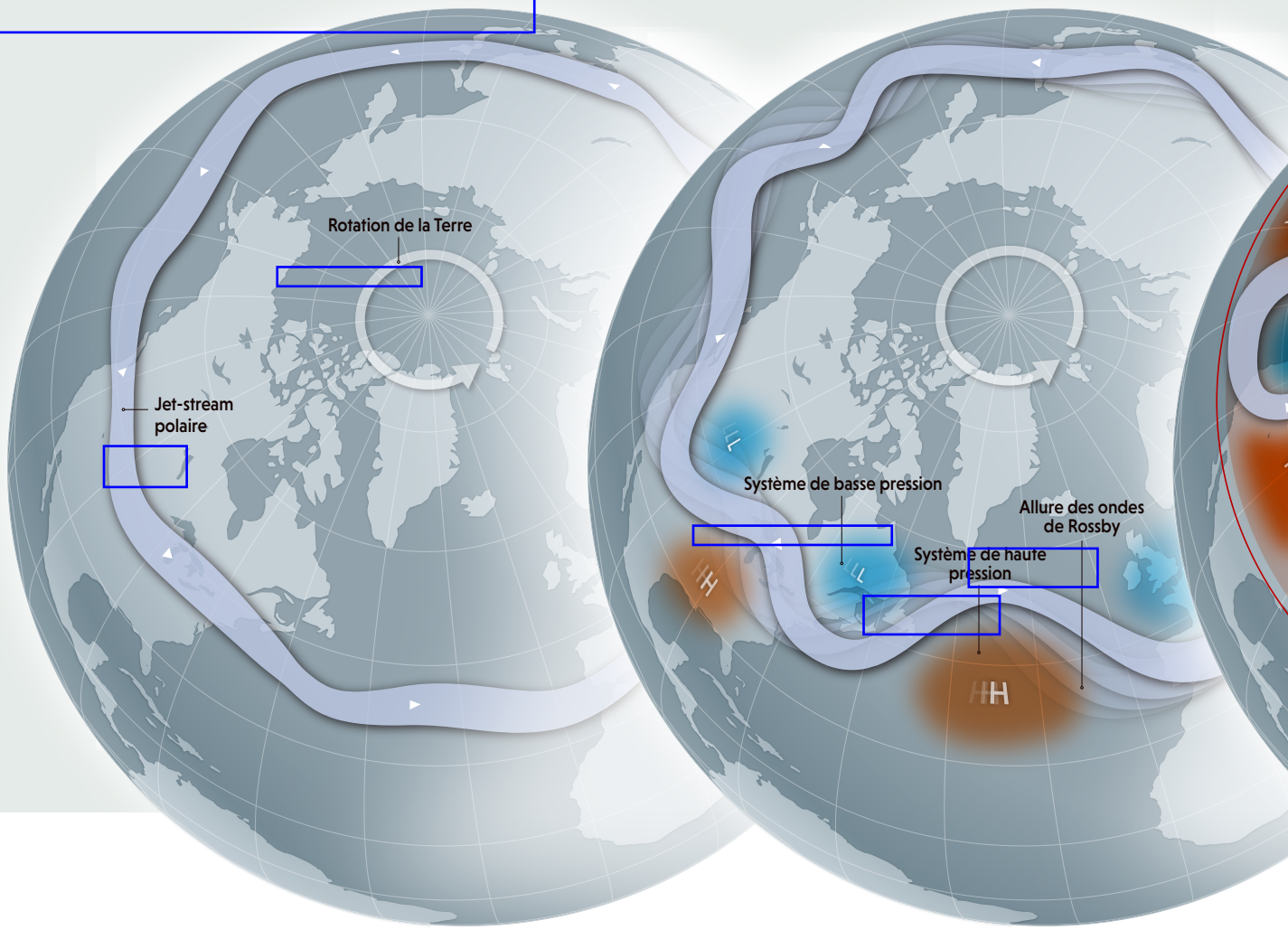
Les jet-streams soufflent entre 30° et 60° de latitude environ, aux frontières des cellules de circulation atmosphérique *(voir ci-dessus)*. Le jet-stream polaire de l'hémisphère Nord va d'ouest en est autour du globe, parfois selon une trajectoire quasi rectiligne et d'autres fois en ondulant légèrement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

UN GUIDE D'ONDES DANS LE CIEL

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

LES CENTRES DE PRESSION ENFLENT

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

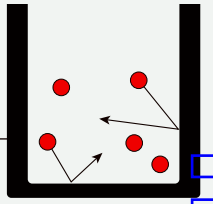


Le jet-stream, amplificateur météorologique

A Physique classique

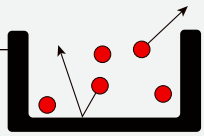
Les murs hauts représentent des barrières d'énergie.

Les électrons sont piégés dans la boîte.



Murs de plus basse énergie

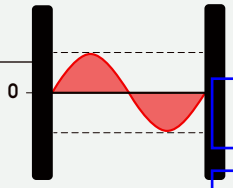
Les électrons peuvent s'échapper grâce à leur énergie propre.



B Physique quantique

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

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



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

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

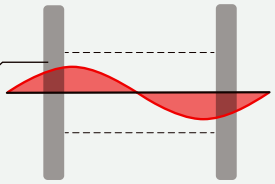


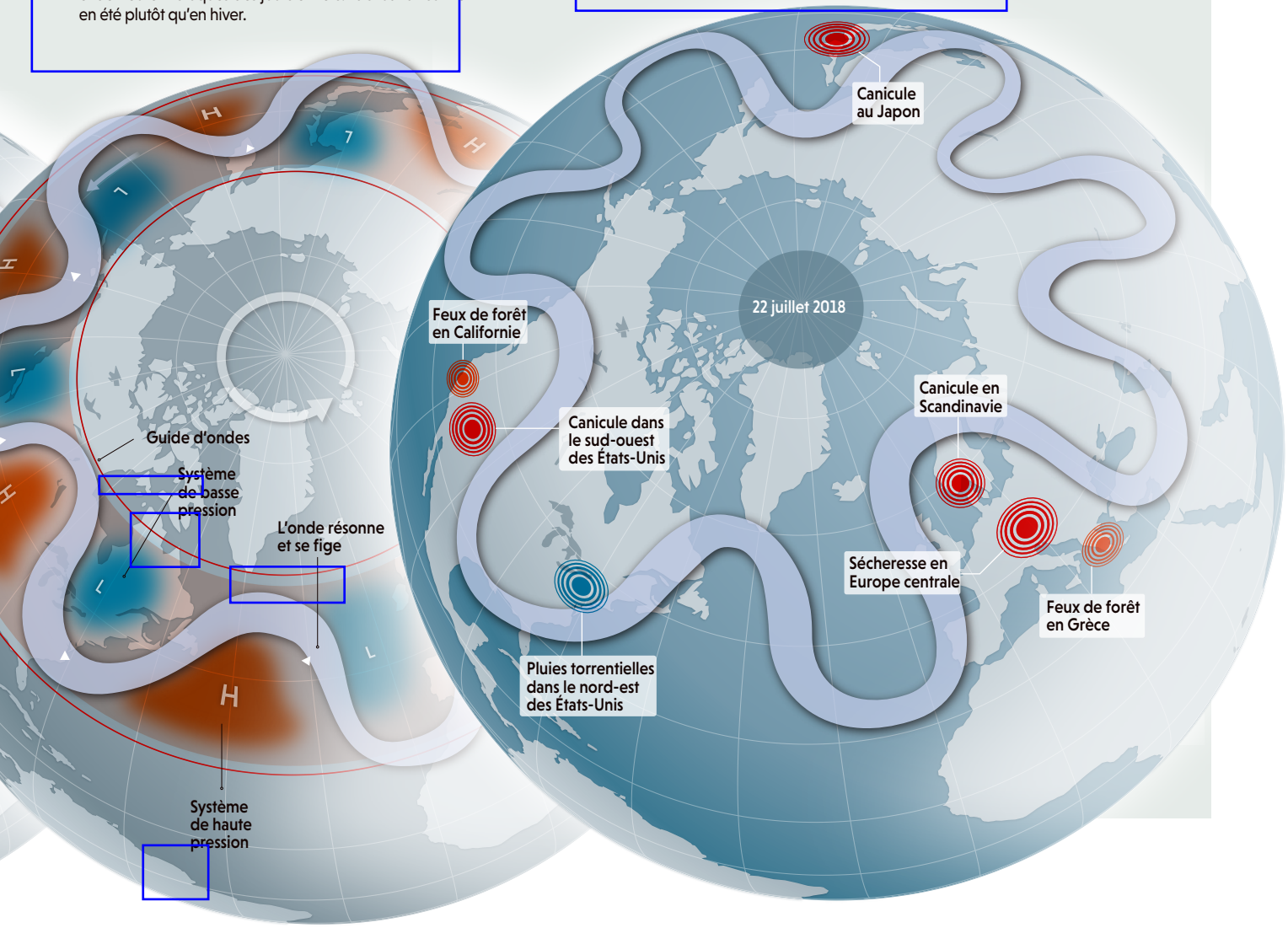
Illustration © 5W Infographics (globes) et Jen Christiansen (guide d'ondes)

RÉSONANCE ORAGEUSE

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

UN MAUVAIS JOUR

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



Ces fleurs de tournesol, près de Golssen, en Allemagne, ont été victimes d'une canicule prolongée en 2018 imputable au comportement du jet-stream.

grâce à une astuce mathématique, l'approximation WKB (pour Gregor Wentzel, Hendrik Kramers et Léon Brillouin).

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

L'onde de Rossby stationnaire est alors piégée à l'intérieur du guide d'ondes, avec une perte minimale d'énergie fuyant par les bords nord et sud. Dans cette situation, les ondes s'immobilisent et s'amplifient en raison de l'AQR, entraînant des calamités météorologiques qui perdurent plusieurs jours.

En 2013, l'équipe de Vladimir Petoukhov, en s'appuyant sur les travaux de David Karoly et Brian Hoskins, a montré que les conditions propices à la situation d'un guide d'ondes pour ondes stationnaires de Rossby surviennent surtout en été. Durant cette saison, le jet-stream est rarement un vent solitaire soufflant d'ouest en est. La plupart du temps, il alterne en fait entre deux couloirs, l'un situé au nord et le second au sud de sa latitude moyenne.

À l'aide de l'approximation WKB, les climatologues ont révélé que c'est précisément dans ces conditions de jet à « double chemin » que l'atmosphère peut se comporter comme un guide d'ondes pour les ondes de Rossby de courte longueur d'onde. L'amplitude de ces ondes est souvent faible, mais si une boucle initiale est créée lorsqu'une masse d'air se déplaçant d'ouest en est atteint les montagnes Rocheuses ou les Alpes, ou lorsque cette masse d'air rencontre un fort contraste de température de surface à la frontière entre la terre et l'océan, les ondes de Rossby peuvent s'amplifier rapidement grâce à l'AQR.

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

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

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

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN CAUSE

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

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

© Sean Gallup/Getty Images

intenses et longues. Mais qu'en est-il de l'onde stationnaire et de l'AQR?

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

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

Ce basculement de régime résulte d'une autre activité humaine participant au changement climatique : les polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre, émis par exemple par la combustion du charbon. Sous forme d'aérosols, ces polluants dérivent dans l'atmosphère.

Cette pollution a été responsable des pluies acides dans les années 1950 à 1970 aux États-Unis. La loi sur la lutte contre la pollution atmosphérique (Clean Air Act) a alors imposé aux industriels d'équiper les cheminées d'épurateurs afin d'éliminer le dioxyde de soufre des émissions. Cela a sauvé des forêts, des lacs et des cours d'eau, mais a aussi contribué à accélérer le réchauffement climatique à partir des années 1970, car ces particules réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace : plus rares dans le ciel, elles ont moins rempli cette fonction.

Une grande partie du reste du monde – et surtout la Chine – fonctionne encore avec d'anciennes pratiques industrielles. Le scénario habituellement envisagé par le Giec suppose que des pays comme la Chine continueront à brûler du charbon, contribuant ainsi à une augmentation des émissions de CO_2 qui en ferait plus que tripler le niveau préindustriel d'ici à la fin du XXIe siècle. Le scénario suppose toutefois que ces industries installeront des épurateurs ces prochaines décennies.

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

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

Y a-t-il une issue? Si le monde agit maintenant et s'engage vers une diminution significative des émissions de carbone dans l'atmosphère, nous pouvons encore éviter un réchauffement catastrophique de 2 °C, ce qui nous épargnerait probablement une aggravation de l'AQR. La voie la plus sûre (et la plus économique) consiste à limiter immédiatement l'usage de combustibles fossiles et les autres activités humaines qui enrichissent l'atmosphère en gaz à effet de serre.

LA PROBABILITÉ DES CALAMITÉS MÉTÉOROLOGIQUES A AUGMENTÉ D'ENVIRON 50 %

LE FUTUR EST ENTRE NOS MAINS

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

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

BIBLIOGRAPHIE

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

D. COUMOU *ET AL.*, The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation, *Nature Communications*, vol. 9, article 2959, 2018.

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

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

L'ESSENTIEL

- Les tornades de feu, combinaisons de tornade et d'incendie, sont extrêmement rares mais très dangereuses.
- Leur formation nécessite à la fois un grand incendie et un mouvement de rotation atmosphérique, que le feu va concentrer sous la forme d'un tube d'air tourbillonnant vertical.
- Les chercheurs commencent à bien comprendre la physique du phénomène, mais restent incapables de prévoir son apparition.

L'AUTEUR

JASON FORTHOFER
pompier et ingénieur, chercheur au laboratoire des sciences du feu de Missoula (Montana, États-Unis), au Service forestier des États-Unis

Dans un tourbillon d'air et de feu

Lorsqu'un incendie se combine à des vents tournoyants, une tornade de feu se forme. Même si les chercheurs comprennent de mieux en mieux la physique de ces phénomènes dévastateurs, leur prévision reste un défi.

Nous étions fin juillet 2018. De grands incendies dévastaient le sud-ouest de l'Oregon et le nord de la Californie (l'incendie dit «de Carr») et je venais en avion à la rencontre d'une unité de pompiers endeuillée: «L'un de mes pompiers est mort dans une tornade qui a projeté son véhicule à des dizaines de mètres d'altitude», m'avait expliqué son chef. Une tornade? Oui, mais une tornade de feu!

Dix ans auparavant, j'avais été le témoin pour la première fois des conséquences d'une tornade de feu. Celle-ci s'était produite au cours du monstrueux incendie dit «des Indiens» qui avait fait rage dans la forêt domaniale de Los Padres, en Californie centrale, réduisant en cendres 329 kilomètres carrés de végétation. Un tourbillon de vent et de feu de plus de 300 mètres de diamètre s'était formé et s'était abattu sur une équipe de pompiers. Par chance, ils se trouvaient à ce moment-là sur une autoroute à deux voies, ce qui leur avait sauvé la vie. Quelques mètres plus loin, ils auraient été tués par les débris d'arbres et de végétaux arrachés partout par la tornade.

À mon arrivée sur le site, j'avais vu d'énormes branches de chêne gisant partout, sur un sol >

Au laboratoire des sciences du feu de Missoula, dans le Montana, on crée des tornades de feu miniatures en mettant en rotation l'air aspiré au-dessus d'une cuvette d'alcool en feu.

© Toutes les photographies sont de Spencer Lowell

décapé. La scène m'avait impressionné et inquiété. Il était évident qu'une telle tornade risquait d'atteindre et de blesser des pompiers même dans un abri considéré comme sûr. On n'était pas passé loin de la catastrophe…

Afin de comprendre ce qu'est une tornade de feu, il faut se remémorer ce qu'est un feu de forêt ordinaire. Un tel phénomène naît de la rencontre entre une source de chaleur de température supérieure à 600 °C et une végétation inflammable. Une fois allumé, le feu prend la forme d'un front de flammes dépassant en hauteur la végétation qui se consume et poussant devant lui un mélange de gaz et d'air brûlant. Cette «vague de chaleur» de plusieurs centaines de degrés s'étend vers l'avant jusqu'à une distance qui peut excéder trois fois la hauteur des flammes. Prise dans la chaleur, la végétation subit une pyrolyse, c'est-à-dire une très rapide décomposition chimique due à l'effet thermique. Cela dégage un volume important de vapeur d'eau et de gaz inflammables, lesquels s'embrasent d'un seul coup, ce qui déplace le front vers l'avant, tandis qu'une colonne de convection plus ou moins verticale, selon le vent, surmonte l'incendie et emporte la fumée.

En fonction des écoulements d'air au voisinage de l'incendie, il peut alors arriver que des «tourbillons de feu» se forment. Ces colonnes de feu tournantes ont la taille de l'un de ces éphémères tourbillons de poussière que nous apercevons parfois. Une tornade de feu, en revanche, combine le feu et des vents tournoyants aussi violents que ceux d'une véritable tornade. Un tel phénomène est rare au point d'en être devenu quasi mythique.

PLUSIEURS DÉFINITIONS

En 2008, de retour à mon laboratoire, je m'étais lancé dans une recherche bibliographique. Plusieurs tornades de feu avaient bien été signalées, mais les informations disponibles étaient si rares que les chercheurs ne s'accordaient même pas sur la définition du phénomène. Certains l'associaient exclusivement à la formation d'un pyrocumulonimbus (étymologiquement un «nuage de pluie cumulé dû au feu»), c'est-à-dire l'un de ces nuages d'orage se formant à partir de la vapeur d'eau que libèrent les incendies en dévorant la végétation. Pour les tenants du lien entre tornade de feu et pyrocumulonimbus, il ne peut y avoir de véritable tornade de feu qu'en relation avec un pyrocumulonimbus.

Si l'on applique cette définition, la seule tornade de feu jamais documentée est celle apparue en 2003 lors d'un grand incendie près de Canberra, en Australie, et qui a dévasté une bande longue de quelque 25 kilomètres… Cette définition semblait toutefois trop restrictive pour être utile aux pompiers. En adoptant la définition plus pragmatique de «tourbillon de feu accompagné de vents analogues à ceux d'une tornade», avec mon collègue Bret Butler, nous avions réuni toutes les informations disponibles dans un manuel et des formations destinées aux pompiers. Puis l'incendie de Carr s'est déclaré, et avec lui la tornade de feu meurtrière sur laquelle j'ai enquêté.

LA TORNADE DE FEU FAISAIT PLUS DE 300 MÈTRES DE DIAMÈTRE ET S'ÉLEVAIT JUSQU'À 4800 MÈTRES

UN CHAMP DE BATAILLE

Le site ressemblait à un champ de bataille. Pour m'aider, j'avais recruté le météorologue Joshua Wurman. Nous n'avions jamais rien vu de tel. Des îlots entiers de maisons avaient été rasés. Les toitures et toutes sortes de débris jonchaient le sol. Plusieurs voitures avaient enchaîné des tonneaux. Déracinés ou cassés, les arbres avaient perdu leur écorce sous les assauts d'un vent transportant sable et cailloux. Trois pylônes métalliques de 30 mètres de haut s'étaient écroulés…

Nous avons estimé que des vents avaient soufflé ici à 265 kilomètres par heure. Cette vitesse signifie une tornade de niveau 3 sur l'échelle de Fujita (qui classe les tornades selon la vitesse des vents sur une échelle allant de 0 à 5). En Californie, seulement deux tornades normales de cette force sont documentées… Or la tornade de l'incendie de Carr n'était pas «normale»: il s'agissait d'une tornade de feu à l'intérieur de laquelle des gaz brûlaient à 1500 °C, tandis que sa base faisait plus de 300 mètres de diamètre pour une hauteur de 4800 mètres. Durant au moins 40 minutes, elle s'est déplacée lentement, laissant une traînée de destructions d'environ 1,5 kilomètre de long.

Selon les témoins, la tornade de feu s'est produite le soir du 26 juillet 2018, à l'occasion d'un feu si étendu et si intense qu'il avait créé des pyrocumulonimbus atteignant plus de 5 kilomètres d'altitude. Vers 17h30, les flammes ont soudainement foncé vers l'est, tuant un pompier au volant d'un bulldozer ainsi qu'un habitant resté prisonnier de son domicile. Alors que l'incendie s'approchait de la périphérie de la ville de Redding, il a donné naissance à plusieurs tourbillons de feu et a projeté des brandons à plus de 1,5 kilomètre en avant à travers la rivière Sacramento. Cela a déclenché plusieurs incendies secondaires à proximité de maisons. La situation est rapidement devenue chaotique.

Les débris emportés par le vent ont endommagé curieusement deux camions de pompier. Alors que ces deux lourds véhicules roulaient dans la même direction à 50 mètres de distance, l'un fut abîmé surtout du côté du conducteur, et l'autre surtout du côté passager, ce qui témoigne du mouvement rotatif de l'air.

L'air se met spontanément à tourbillonner au centre d'un trio de planches en feu disposées de façon triangulaire. L'un des feux rassemble ensuite les filets d'air tournant en un tourbillon de feu. De façon similaire, les feux de forêt ou les incendies urbains peuvent engendrer des tornades de feu.

Quelles sont les causes des tornades de feu? Pouvons-nous en prédire la formation afin de pouvoir évacuer les gens à temps? Pour répondre, une première étape consiste à rechercher des événements comparables dans le passé. En 1871, une ville du Wisconsin fut dévastée par un phénomène qui, à en juger par la quantité massive d'objets déplacés, dont une maison, était sans doute une tornade de feu. En 1964, l'incendie du Polo, en Californie, a fait quatre blessés et détruit deux maisons, une grange, trois voitures et un verger d'avocatiers.

L'une des plus horribles tornades de feu s'est produite lors des bombardements de Hambourg, entre le 25 juillet et le 3 août 1943, pendant lesquels ont péri plus de 40000 habitants: selon le géographe Charles Ebert, ce *feuersturm*, c'est-à-dire cette «tempête de feu», mesurait plus de 3 kilomètres de large et 4,5 kilomètres de haut.

L'horreur du *feuersturm* de Hambourg le dispute à celle de la tornade du grand incendie de Tokyo de 1923. Un tremblement de terre majeur avait déclenché le feu. Puis une grande tornade de feu s'était formée et avait tué en 15 minutes 38000 personnes.

Pendant plus d'un demi-siècle, on a expliqué cet événement en supposant qu'une tornade normale s'était formée exactement là où un grand incendie faisait rage. Mais dans les années 1980 et 1990, Seiji Soma et Kozo Saito, de l'université du Kentucky, lurent les récits historiques de l'événement afin de construire une maquette du lieu et d'imiter les vents ayant soufflé ce jour-là par des courants d'air appropriés. Ils reproduisirent ainsi à petite échelle le grand incendie de Tokyo, et mirent en évidence que cet incendie avait lui-même engendré sa tornade de feu.

Cette recherche s'appuyait sur les expériences novatrices réalisées deux décennies plus tôt par George Byram et Robert Martin, du Service forestier des États-Unis. Ils avaient réussi à créer de petits tourbillons de feu dans leur installation de Macon, en Géorgie.

SEPT FOIS PLUS D'ÉNERGIE

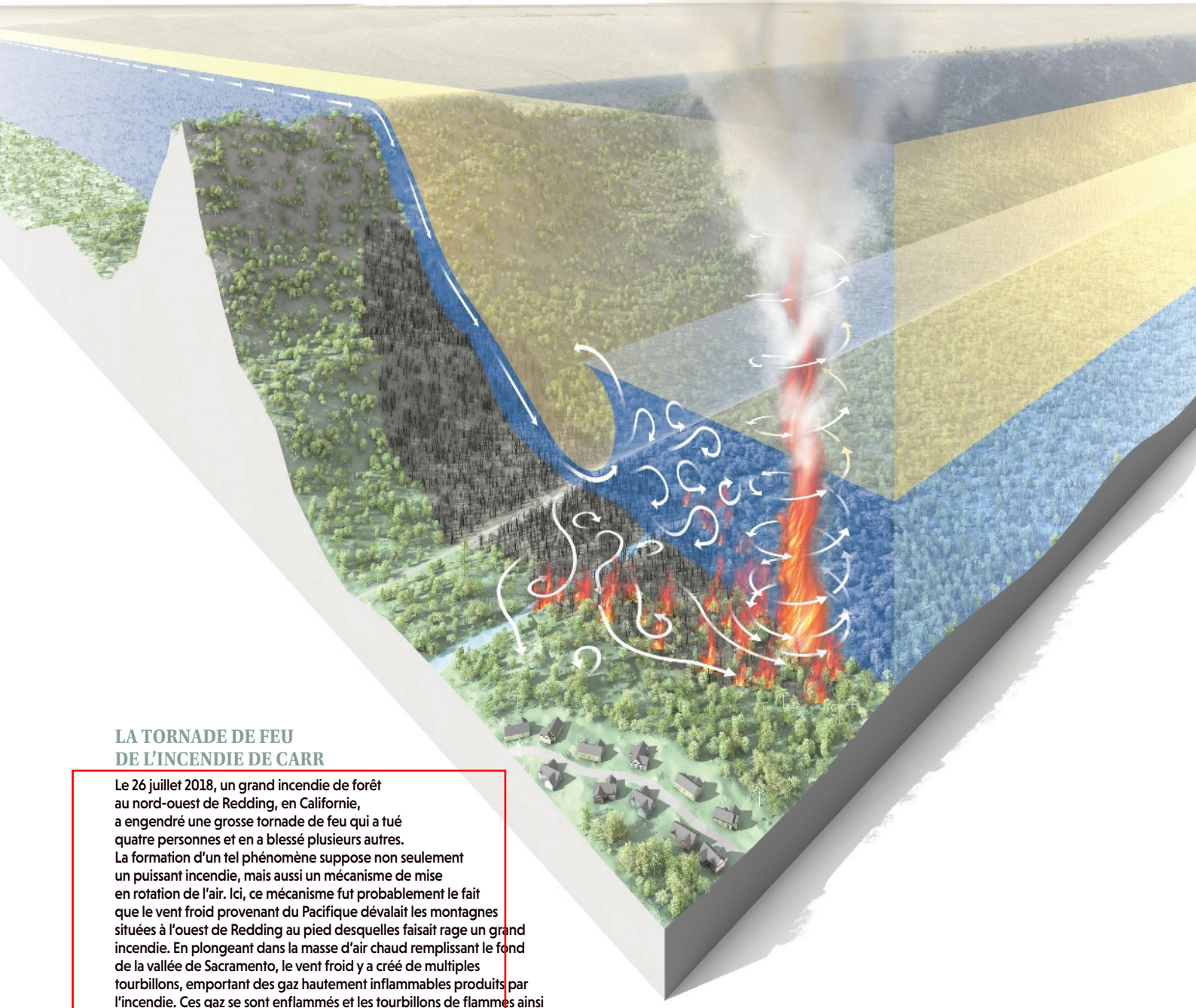
Leur dispositif? Un petit bassin circulaire contenant de l'alcool en train de brûler et entouré de parois cylindriques percées de fentes verticales. Celles-ci forçaient l'air venant alimenter le feu à entrer en rotation. Le tourbillon ainsi formé consommait tout le carburant jusqu'à trois fois plus vite qu'en l'absence de rotation. La présence d'un vent tournant augmente le taux de combustion en amenant les flammes à lécher la surface de l'alcool, ce qui le réchauffe puis enflamme les vapeurs émises. Des recherches ultérieures ont montré que, dans de tels feux, l'énergie dégagée par unité de temps était jusqu'à sept fois plus importante que dans les feux ordinaires.

Quelque chose de semblable se produit dans les tourbillons de feu des incendies de forêt et dans les tornades de feu. Porté à haute température, un morceau de bois produit des centaines de gaz inflammables différents, dont la combustion produit des flammes. Les forts vents horizontaux et tournants de la tornade de feu rabattent les flammes vers la végétation, ce qui renforce sa combustion.

En 1967, Howard Emmons et Shuh-Jing Ying, de l'université Harvard, ont entouré un feu de laboratoire stationnaire d'un grillage cylindrique que l'on pouvait faire tourner à différentes vitesses, ce qui imprimait une rotation à l'air entrant dans les flammes. Les chercheurs >

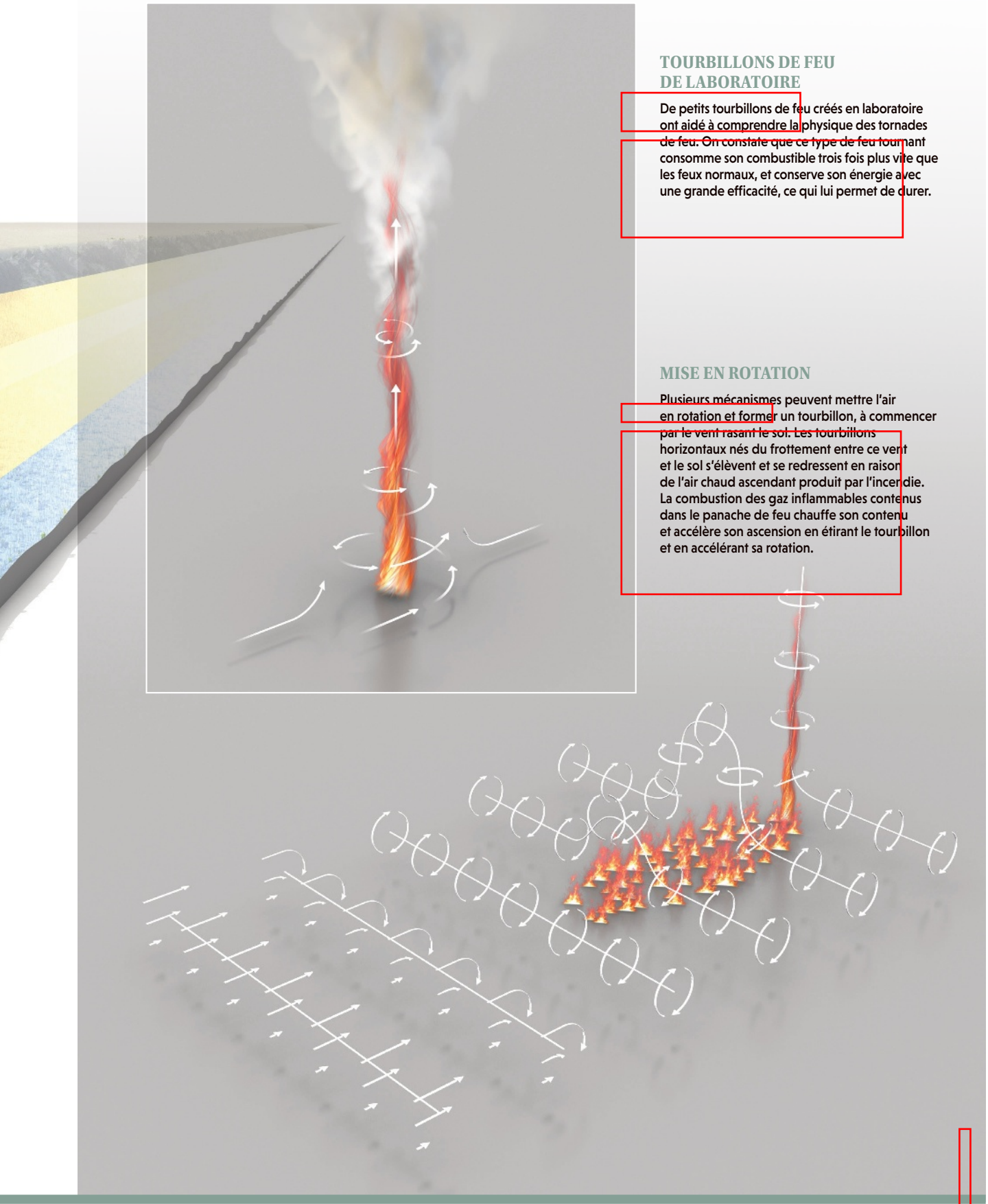
NAISSANCE D'UNE TORNADE DE FEU

Les tornades de feu sont des colonnes de feu et de fumée tournant à des vitesses comparables à celles des vents des tornades habituelles. Elles sont rares, mais extrêmement destructrices. Remarquablement durables, elles peuvent se détacher de l'incendie principal et surprendre des groupes entiers de pompiers. Elles aspirent en hauteur des brandons et les recrachent au loin, ce qui déclenche des incendies secondaires.



LA TORNADE DE FEU DE L'INCENDIE DE CARR

Le 26 juillet 2018, un grand incendie de forêt au nord-ouest de Redding, en Californie, a engendré une grosse tornade de feu qui a tué quatre personnes et en a blessé plusieurs autres. La formation d'un tel phénomène suppose non seulement un puissant incendie, mais aussi un mécanisme de mise en rotation de l'air. Ici, ce mécanisme fut probablement le fait que le vent froid provenant du Pacifique dévalait les montagnes situées à l'ouest de Redding au pied desquelles faisait rage un grand incendie. En plongeant dans la masse d'air chaud remplissant le fond de la vallée de Sacramento, le vent froid y a créé de multiples tourbillons, emportant des gaz hautement inflammables produits par l'incendie. Ces gaz se sont enflammés et les tourbillons de flammes ainsi formés se sont rassemblés, aboutissant à un gigantesque tourbillon de feu aspirant tout à sa base sur son passage : une énorme tornade de feu.



TOURBILLONS DE FEU DE LABORATOIRE

De petits tourbillons de feu créés en laboratoire ont aidé à comprendre la physique des tornades de feu. On constate que ce type de feu tournant consomme son combustible trois fois plus vite que les feux normaux, et conserve son énergie avec une grande efficacité, ce qui lui permet de durer.

MISE EN ROTATION

Plusieurs mécanismes peuvent mettre l'air en rotation et former un tourbillon, à commencer par le vent rasant le sol. Les tourbillons horizontaux nés du frottement entre ce vent et le sol s'élèvent et se redressent en raison de l'air chaud ascendant produit par l'incendie. La combustion des gaz inflammables contenus dans le panache de feu chauffe son contenu et accélère son ascension en étirant le tourbillon et en accélérant sa rotation.

© Bryan Christie Design

ont mesuré la vitesse du vent et la distribution de la température du tourbillon de feu ainsi créé. Ils ont donc mis en évidence que le feu ne suffit pas en lui-même à engendrer un tourbillon de flammes: il faut un mécanisme qui mette l'air en rotation et un autre qui amplifie celle-ci.

LE RÔLE DE L'AIR

Une tornade de feu a essentiellement la même aérodynamique. De nombreux tourbillons se forment naturellement dans l'atmosphère. Ils sont engendrés par les vents tournant autour des montagnes ou longeant le sol, voire par des différences de pression dans l'atmosphère. Le feu, lui, joue deux rôles: il concentre la rotation et la fait monter (les gaz chauds s'élevant vite), ce qui aboutit à un étroit tube d'air et de flammes tournant autour d'un axe plus ou moins vertical.

Dans les premiers instants d'une tornade de feu, l'air chaud surmontant le feu aspire vers le haut l'air venu le remplacer à la base. Ce faisant, il rassemble des tourbillons atmosphériques préexistants. Certains de ces tourbillons sont initialement horizontaux, mais l'aspiration vers le haut tend à les redresser vers la verticale. Ensuite, l'air ascendant s'échauffe à mesure que brûlent les gaz qu'il contient.

La pression exercée par l'air entourant le tourbillon force aussi l'air chaud et léger de l'intérieur du tube de feu à s'élever; le tourbillon ou la tornade de feu s'étire ainsi le long de son axe et son diamètre diminue. Comme le moment cinétique (la quantité de mouvement de rotation) de la masse tournante est une quantité conservée, l'étirement de cette dernière a pour conséquence de faire tourner plus vite le contenu du tourbillon, effet comparable à l'accélération de la rotation d'une patineuse qui rapproche les bras de son corps.

Un tourbillon de feu qui arrive sur une zone en feu tend à s'étirer jusqu'à une hauteur considérable et à tourner très vite; lorsqu'il parvient au-dessus d'une zone déjà brûlée, il s'élargit et ralentit en prenant l'aspect d'un cylindre diffus de fumée. Les mêmes comportements valent pour les tornades de feu. Parfois, la masse en rotation est si large et tourne si lentement que les pompiers ne s'aperçoivent pas qu'il s'agit d'un tourbillon. Quant aux déplacements d'un tourbillon de feu, ils dépendent des vents ambiants et des détails du relief, mais il reste à comprendre de quelle façon précisément.

Howard Emmons et Shuh-Jing Ying avaient aussi montré que les tourbillons de feu conservent avec une remarquable efficacité leur énergie cinétique de rotation, ce qui les rend malheureusement assez persistants. À mesure que la rotation dans une tornade de feu s'accélère, deux forces radiales opposées s'intensifient: d'une part la force centrifuge, qui tire chaque parcelle d'air vers l'extérieur, d'autre part celle due à la basse pression régnant au centre du tourbillon, qui l'aspire au contraire vers l'intérieur. L'équilibre entre ces deux forces limite le mouvement radial de l'air et donc la perte d'énergie cinétique par le tourbillon. Les feux ne présentant pas de rotation échangent, eux, à peu près dix fois plus d'énergie avec l'atmosphère environnante.

Ce mécanisme contribue aussi à rendre les tourbillons de feu plus minces et plus hauts que les feux non tournoyants. La stabilisation, par les forces radiales, des parois tournantes du tube de feu implique que, sauf à la base, pratiquement aucun air n'est aspiré à l'intérieur. Peu d'oxygène est donc disponible pour la combustion. Une partie des gaz combustibles doit donc remonter haut à l'intérieur du tube avant qu'il y en ait assez pour brûler.

Tout aussi dangereux est le fait que l'ascension rapide de gaz chauds et peu denses crée une très basse pression à la base du tourbillon. Le frottement de l'air contre le sol ralentit la rotation, ce qui réduit la force centrifuge poussant l'air vers l'extérieur. Comme l'aspiration vers l'intérieur du tube engendrée par la pression reste la même, de l'air rasant le sol s'engouffre dans la tornade de feu. L'effet produit est le même que celui qu'aurait un aspirateur géant, avalant de l'air et des débris enflammés à sa base, les tirant vers le haut à des vitesses extrêmes avant de les éjecter de façon imprévisible depuis des hauteurs considérables, ce qui déclenche des incendies secondaires à distance.

LES TOURBILLONS DE FEU CONSERVENT ASSEZ BIEN LEUR ÉNERGIE DE ROTATION, D'OÙ LEUR PERSISTANCE

Malgré toutes nos nouvelles connaissances sur la physique des tornades de feu, nous ne savons toujours pas prédire où et quand l'une d'elles se produira. Au moins une chose est sûre: l'ingrédient essentiel à leur formation est l'existence d'une source de rotation importante.

L'ENDROIT IDÉAL

À cet égard, des études de cas nous ont montré que l'un des endroits les plus propices à la formation de tornades de feu se trouve du côté sous le vent d'une montagne. En contournant la montagne, le flux d'air crée des mouvements tourbillonnants en arrière du mont, comme dans l'écoulement d'une rivière immédiatement en aval d'un rocher. Si à ces tourbillons s'ajoute un incendie, ce dernier pourra rassembler tous ces mouvements rotatifs et les transformer en une tornade de feu.

Toutefois, la pratique nous a appris que des tourbillons de feu peuvent aussi apparaître sur un terrain plat et en l'absence de vent. Ainsi, un

En novembre 2008, l'incendie de Corona Yorba Linda, en Californie, a créé un grand tourbillon de feu, une tornade de feu peut-être, qui a menacé les habitations.

grand tourbillon de feu apparu au Kansas a probablement été formé par la collision d'un front froid avec l'air ambiant chaud au-dessus d'un champ en feu. Et en 2007, Rui Zhou et Zi-Niu Wu, de l'université Tsinghua, à Pékin, ont montré que certaines configurations où plusieurs feux sont présents peuvent déclencher des courants d'air au sol et finir par leur imprimer une rotation. Or ces configurations peuvent apparaître spontanément à la faveur des sautes de feu, c'est-à-dire des incendies secondaires allumés par les brandons que beaucoup d'incendies projettent.

L'AIR FRAIS DE L'OCÉAN

Après toutes ces considérations, sommes-nous en mesure de préciser l'origine de la rotation d'air qui a causé la terrible tornade de feu de l'incendie de Carr? Étant donné les nombreux tourbillons de feu qui ont précédé le phénomène, d'importants mouvements de rotation étaient sans doute présents dans le secteur. Natalie Wagenbrenner, de notre laboratoire de Missoula, s'est livrée à des simulations numériques de la météo de cette journée-là.

Son travail a montré que l'air frais et dense de l'océan Pacifique était poussé vers l'est et au-dessus du sommet d'une chaîne de montagnes situées à l'ouest de Redding. Cet air frais était beaucoup plus lourd que l'air chaud de la vallée de Sacramento, puisque l'aéroport de Redding a enregistré ce jour-là une température maximale de 45 °C! Par gravité, l'air froid marin s'est donc écoulé le long des flancs des montagnes vers le fond de la vallée. Cependant, curieusement, à l'endroit où la tornade de feu s'était formée, ces forts vents de surface semblaient avoir disparu.

Comment était-ce possible? En fait, nous avions affaire à l'équivalent atmosphérique du ressaut hydraulique subi par l'eau se déversant dans le lac en aval d'un barrage. On observe alors que la surface du plan d'eau calme est rehaussée (c'est le ressaut) par la formation et le maintien d'une vague déferlante stationnaire, qui marque la limite entre les écoulements. Or cette vague s'accompagne d'intenses mouvements tourbillonnaires.

De façon analogue, l'air froid et dense qui descendait à vive allure le flanc de la montagne a pénétré dans le bassin d'air chaud et calme de la vallée de Sacramento, engendrant un ressaut probablement responsable des puissants mouvements de rotation à l'origine de la tornade de feu de l'incendie de Carr (*voir l'encadré pages 56 et 57*).

Par ailleurs, Neil Lareau, de l'université du Nevada, et ses collègues ont proposé en 2018 que les pyrocumulonimbus de plus de 10 kilomètres d'altitude qui surmontaient l'incendie de Carr pendant que la tornade de feu s'est formée ont contribué aussi à étirer le tourbillon jusqu'à une grande altitude, tout en l'amincissant et en l'accélérant.

Si les incendies de forêt continuent à s'intensifier, comme le laisse prévoir le réchauffement climatique, il se pourrait que nous soyons confrontés plus souvent à des tornades de feu. Espérons que de nouvelles recherches, combinées aux progrès de la prévision météorologique et de la puissance de calcul, nous permettront bientôt de préciser les conditions favorables à la formation d'une tornade de feu et d'alerter à temps les populations concernées. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. P. LAREAU *ET AL.*, The Carr Fire vortex: A case of pyrotornadogenesis?, *Geophysical Research Letters*, vol. 45(23), pp. 13, 107-113 et 115, 2018.

J. M. FORTHOFER ET S. L. GOODRICK, Vortices and wildland fire, dans P. A. Werth *et al.* (dir.), *Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior*, vol. 1 for Fire Managers, US Forest Service Pacific Northwest Research Station, novembre 2011.

La fumée de l'incendie de Lick Creek, dans l'Idaho, a été étudiée depuis un avion qui en a traversé le panache le 2 août 2019.

Au cœur des ténèbres enfumées

Alors que les incendies de forêt sont de plus en plus nombreux, une campagne aérienne cherche à comprendre comment les fumées qu'ils émettent affectent la santé humaine.

© Matt Nager

L'ESSENTIEL

- À mesure que les incendies s'intensifient, ils deviennent une menace croissante pour la santé publique.
- À travers le projet *Firex-AQ*, une équipe de plus de quatre cents scientifiques a enquêté sur la composition chimique de la fumée émise par les feux de biomasse.
- Les données collectées éclairent la dynamique des composés chimiques dans les fumées.
- Elles aideront à déterminer quels feux sont les plus dangereux.

L'AUTEUR

KYLE DICKMAN est un journaliste indépendant. Il a passé cinq saisons à combattre les feux en Californie.

« C'**est intéressant. Elle n'est pas trop épaisse,** » constata Jim Crawford. En cet après-midi de fin juillet 2019, ce chimiste de l'atmosphère se dirigeait droit vers des volutes de fumée d'un incendie de forêt à bord d'un vieux DC-8 réaménagé par la Nasa en un laboratoire aérien. Dans la cabine, trente-cinq scientifiques et ingénieurs calibraient leurs instruments, la plupart conçus pour mesurer des polluants. L'avion se mit à trembler lorsqu'il entra dans un panache de fumée de l'incendie de North Hills, à 3 650 mètres d'altitude, dans les environs de Missoula, dans le Montana.

Ce vol était le troisième du projet *Firex-AQ*, (pour *Fire influence on regional to global environments and air quality*, soit « Influence du feu sur des environnements régionaux à globaux et sur la qualité de l'air ») un programme ambitieux de trois ans, mené par l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) et la Nasa. Il vise à déterminer la composition chimique de la fumée émise par divers types d'incendies et à mesurer sa dangerosité sur la santé humaine. Durant l'été 2019, le DC-8 et deux autres appareils ont traversé plus de cent colonnes différentes, de la petite bulle de fumée s'élevant d'un minuscule brûlis agricole dans le Kansas, au « champignon » géant s'élevant jusqu'à 9450 mètres d'altitude au-dessus des feux de Williams Flats, dans l'État de Washington, un incendie comparable à une éruption volcanique ! Pas trop tôt : bien que les feux émettent jusqu'à un tiers des particules présentes dans l'atmosphère, « peu d'études s'intéressent au rôle des différents composants de la fumée sur les maladies et leur sévérité » déplorait encore en 2018 un directeur de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA).

Nous savons certes que l'exposition chronique à des particules fines, présentes dans toute fumée, cause des maladies cardiaques et pulmonaires, entraînant la mort prématurée de 4,2 millions d'individus dans le monde pour la seule année 2016. Sans compter le million de morts prématurées annuel attribué à l'ozone, un gaz notamment produit par des réactions chimiques entre des composés de la fumée et de l'atmosphère et qui réduit les fonctions pulmonaires après une exposition répétée. Mais il manque les détails : dans quel contexte et par quels mécanismes ces composés toxiques, et d'autres, se forment-ils selon les différents types de fumées ? L'objectif de *Firex-AQ* est de combler à terme ces lacunes.

DES FUMÉES À LA LOUPE

Jim Crawford vérifia sa tablette, faisant défiler les données mises à jour en temps réel sur des centaines de particules et de gaz en train d'être échantillonnées. Même dans de petites villes, les chercheurs détectent une pollution bien pire que celle dont son équipe et lui ont été témoins ce jour-là, au-dessus d'une forêt. « Comment tous ces feux s'additionnent-ils ? dit-il. Quelle quantité d'ozone les feux produisent-ils ? Quelle est la chimie impliquée dans sa formation ? Et comment maîtriser un tel phénomène naturel ? »

Selon Carsten Warneke, de la NOAA et l'un des principaux chercheurs de *Firex-AQ*, les modèles de qualité de l'air traitent la fumée des

incendies comme un nuage de pollution, ou *smog*, alors que c'est un problème complètement différent. Installé dans une base de la garde nationale, à Boise, dans l'Idaho, avec cinquante scientifiques, l'un de ses rôles était de passer au crible les données (relevés météorologiques, nature des combustibles…) sur les incendies en cours afin de déterminer lesquels sont les mieux adaptés aux objectifs du programme. Ce n'est pas toujours simple, car « il y a beaucoup de scientifiques, et tous ne travaillent pas sur le même sous-projet », dit Amber Soja, de l'Institut américain d'aérospatiale, chargée d'informer les quatre cents chercheurs concernés sur l'activité des feux du jour.

TROP DE MODÈLES

La fumée des feux de forêts intrigue en fait depuis le début des années 2000 : tandis qu'ils étudiaient la brume transportée vers l'arctique alaskien depuis l'Asie, ainsi que la qualité de l'air en bordure des villes du nord-est américain, Jim Roberts, lui aussi de la NOAA, et Carsten Warneke ont été surpris de déceler l'empreinte chimique des incendies partout dans leurs données. À l'époque les prévisions d'émissions issues des incendies n'étaient pas fiables. Dans une étude de 2008, la comparaison de quatre modèles dédiés a révélé que les estimations pouvaient varier de l'un à l'autre d'un facteur 10. Pas étonnant si l'on sait que ces modèles n'étaient basés que sur l'étude de trente-neuf incendies différents. Considérant la variabilité des feux, le manque de données était criant.

Jim Roberts et Carsten Warneke se sont alors rapprochés de Bob Yokelson, de l'université du Montana, qui étudiait la fumée des incendies depuis presque trente ans. Ancien pompier, il a aidé à élaborer la première version du projet *Firex-AQ*. Il a longtemps été le seul, avec quelques professeurs d'université, à étudier cette fumée sur le terrain. Ils avaient loué un petit avion de 20 mètres d'envergure (un DHC-6 Twin Otter), l'avaient chargé d'instruments et avaient fait quelques tours autour des colonnes de fumée. Ils s'intéressaient aux mêmes aérosols, particules fines et gaz aujourd'hui au centre de l'attention de *Firex*-AQ, mais leurs mesures étaient bien plus grossières.

Plusieurs saisons successives d'incendies et de fumée historiquement sévères ont changé la donne. Des millions de dollars furent alloués pour des campagnes de recherche plus substantielles et le projet *Firex-AQ* gagna en envergure. Un DC-8, qui pouvait voler à haute altitude et sur une grande distance, a rejoint la flotte, ainsi que quelques avions à hélices rapides avec des instruments d'analyse de la qualité de l'air pour voler plus bas et plus près des colonnes de fumée. L'intérieur du DC-8 est un vrai laboratoire, avec par exemple des appareils à lasers de longueurs d'onde différentes pour cartographier une colonne de fumée en trois dimensions et en temps réel. Divers instruments détectent de nombreux composés chimiques, notamment l'acétonitrile connu pour être un indicateur de la combustion de biomasse. D'autres capteurs sont dédiés aux traces de carbone noir et brun, à la composition en aérosols submicronique… L'équipe de *Firex-AQ* a aussi équipé des camions pour étudier la fumée au sol.

DU FEU À LA POLYARTHRITE

Déjà en 2009, Jim Roberts avait identifié un composé particulièrement nocif dans la fumée d'un feu de branches de pin ponderosa et d'autres combustibles caractéristiques de l'ouest des États-Unis, l'acide isocyanique. Une exposition régulière à cette molécule favorise les cataractes, la polyarthrite rhumatoïde et des maladies cardiaques. C'est à cette époque que l'incendie le plus destructeur de l'histoire du Colorado se déclara, brûlant des dizaines de milliers d'hectares et détruisant plusieurs centaines de maisons. À Boulder, dans ce même état, Jim Roberts analysa alors l'air de la ville et releva la plus haute concentration d'acide isocyanique jamais mesurée dans l'atmosphère. Avant lui, personne n'avait pensé à chercher ce composé. « Je n'en ai pas dormi deux nuits d'affilée, se rappelle-t-il. Personne n'avait imaginé que la fumée contenait de l'acide isocyanique. Qu'ignorions-nous d'autre ? »

DEVANT L'INTENSIFICATION DES INCENDIES, CERTAINS SPÉCIALISTES N'HÉSITENT PAS À PARLER DE PYROCÈNE POUR QUALIFIER NOTRE ÉPOQUE

En général, la qualité de l'air dans les villes américaines s'est améliorée depuis que le Congrès a voté le Clean Air Act en 1970. Mais quand des incendies se déclarent près des zones urbaines, la fumée réduit à néant les progrès accomplis. Résultat : les huit villes des États-Unis les plus polluées par l'ozone se trouvent toutes dans l'Ouest. Et 23 des 25 villes les plus polluées aux PM 2,5 (c'est-à-dire les particules fines de moins de 2,5 micromètres de diamètre capables de >

1

pénétrer dans les poumons puis dans le sang) se situent dans l'Ouest ou en Alaska.

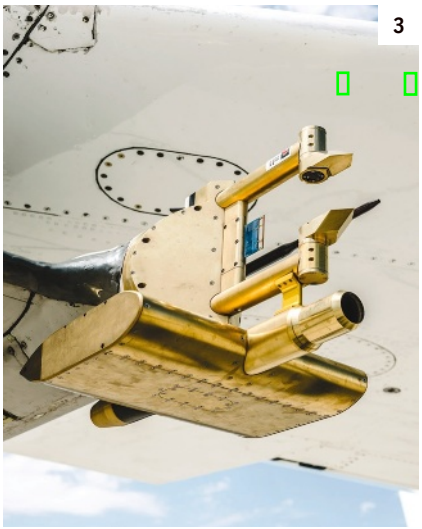
L'exposition à long terme à ces PM 2,5 peut être mortelle, même lorsque les niveaux sont inférieurs aux seuils autorisés. En 2017 et 2018, plus de 10 millions de personnes dans l'ouest des États-Unis ont été exposées à des niveaux de PM 2,5 excédant les standards en matière de qualité de l'air de l'EPA. Dans trente ans, ce nombre dépassera 82 millions. D'ici à 2100, on estime que l'inhalation chronique de fumée issue des incendies tuera 40000 personnes par an, rien qu'aux États-Unis.

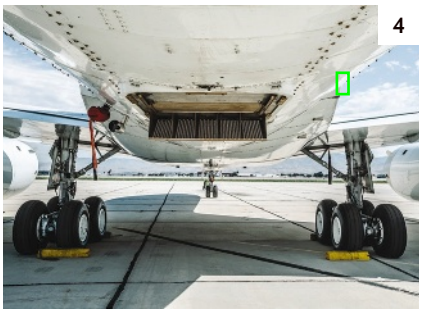
Premier coupable, le réchauffement climatique qui rend l'ouest de plus en plus chaud et sec. Ainsi dans une étude parue en juillet 2019, le climatologue Park Williams, de l'université Columbia, à New York, a montré que la multiplication par cinq de la superficie brûlée entre 1972 et 2018 est très vraisemblablement liée à une augmentation moyenne de 1,4 °C des températures lors d'une journée chaude. C'est le réchauffement anthropogénique, dit-il, qu'il faut blâmer.

La gestion des forêts joue aussi un rôle significatif dans l'aggravation des incendies. En proscrivant le feu dans des écosystèmes où il est pourtant essentiel, la densité de combustible dans de nombreuses forêts atteint des records (*voir Combattre le feu par le feu, par Jane Braxton Little, page 88*). Par exemple, dans certaines parties de la Sierra Nevada californienne, on compte 400 arbres par hectare quand il n'y en avait que 20 à 30 auparavant. Parallèlement, les humains continuent de s'installer dans des endroits vulnérables. Dans les années 1990, 30,8 millions de personnes aux États-Unis vivaient près ou sur un terrain qui s'embrasait régulièrement ; aujourd'hui, ils sont 43,4 millions. La conjonction de ces éléments explique le lourd bilan de l'incendie Camp Fire qui rasa en novembre 2018 la cité de 26800 habitants de Paradise, en Californie, brûlant 18804 bâtiments et tuant au moins 85 personnes.

BIENVENUE DANS LE PYROCÈNE

Le problème est mondial, environ 4% du globe brûlant chaque année. Les feux de brousse australiens ont brûlé entre la fin de 2019 et le début de 2020 près de 186000 kilomètres carrés (plus du tiers de la superficie de la France). Bien que la surface totale qui brûle chaque année diminue à mesure que les lieux naturels sont convertis en terres agricoles, les changements climatiques favorisent à présent des brasiers dans des environnements historiquement épargnés par les incendies et les intensifient dans les zones qui y sont habituées. En été 2018, l'Irlande du Nord a connu des incendies sans précédent. Ce fut aussi le cas





L'intérieur de la cabine d'un DC-8 a été reconverti par la Nasa et la NOAA en laboratoire volant *(1)* truffé d'instruments de mesure, par exemple un spectromètre de masse dans lequel Xu Lu ajoute de l'azote liquide *(2)*. Des appareils sont installés sous les ailes *(3, des compteurs de particules)*, d'autres sous le fuselage *(4)*. Des échantillons d'air seront prélevés dans des récipients préparés auparavant *(5, sous la supervision de Vanessa Selimovic)*.

pour 3 millions d'hectares en Sibérie. Le spécialiste des incendies Stephen Pyne, de l'université d'État de l'Arizona, n'hésite pas à surnommer cette époque le Pyrocène.

En déterminant, à plus fine résolution, la composition de la fumée et les processus par lesquels ses produits les plus délétères se forment, les prévisionnistes de la qualité de l'air anticiperaient mieux les impacts des incendies sur la santé humaine. Savoir comment la fumée diffère selon les types de feux simplifierait également la gestion des incendies, en particulier quand il s'agit d'allumer des feux dirigés. Ces incendies contrôlés, d'intensité réduite, imitent leur contrepartie naturelle et sont allumés afin de réduire la quantité de combustible disponible pour de futurs feux sauvages. Ils sont aussi notoirement difficiles à déclencher pour des raisons sociales, environnementales et réglementaires. L'EPA encadre rigoureusement leur utilisation. Pour autant, aucune étude de terrain n'a prouvé que les émissions issues de ces feux de moindre intensité sont aussi toxiques que celles émises par des incendies géants.

Afin de déterminer ce que devient la fumée en aval du vent et comment elle s'enrichit en aérosols nocifs et en ozone, la première chose à connaître est sa composition au point d'embrasement. Est-ce que certaines plantes, en brûlant, génèrent une fumée contenant plus d'ozone et de particules fines PM 2,5 que d'autres ?

L'équipe de *Firex-AQ* a collecté des pins ponderosa du Montana, des lilas de Californie, des chênes de l'Arizona et dix-huit autres essences régulièrement brûlées dans l'ouest. D'abord séché et pesé, chaque échantillon a été brûlé dans des conditions contrôlées reproduisant deux types de feux : l'un, couvant, dont la fumée semble visqueuse comme de la lave, et un autre, plus ouvert, plus chaud, avec une fumée moins dense accompagnant les flammes vers le haut.

Étonnamment, la température de combustion dicte bien plus la composition des émissions que la nature des plantes brûlées. Certains composés organiques volatiles (des COV) sont émis par feu couvant, tandis que d'autres apparaissent surtout quand la chaleur est plus forte. Au total, la température du feu suffit à prédire environ 80 % du contenu des fumées.

Pour certains de ces feux, les chercheurs ont capturé des échantillons de fumée et les ont enfermés dans un réceptacle en Teflon éclairé par des lampes à ultraviolets pour simuler la lumière du soleil. Ils s'intéressaient aux PM 2,5, qui sont émis par tous les feux. Dans les récipients, la quantité initiale de PM 2,5 a rapidement diminué, mais lors de certaines expériences, après plusieurs heures, des >

© Photographie, par Mairi Nager

composés chimiques ont commencé à s'agréger, faisant ensuite remonter les niveaux de PM 2,5. Selon Carsten Warneke, la reformation des PM 2,5 s'appuierait sur le pyrocatéchol, une molécule aromatique (le benzène-1,2-diol) émise par le bois lors d'un feu couvant. Ainsi, en liant la température d'un feu à la production de PM 2,5, l'étude rendait possible la prévision de la quantité de PM 2,5 à l'aide de satellites mesurant l'intensité des incendies.

LE GEL DE L'OZONE

Avec Matt Coggon, de la NOAA, l'équipe a montré que le pyrochatécol jouerait également un rôle clé dans la formation d'ozone. Il n'est pas directement émis par les feux, mais se forme lorsque l'oxyde d'azote, les composés organiques volatiles et la lumière du soleil interagissent. Il y a toujours des composés organiques volatiles dans la fumée, et la lumière du soleil est omniprésente. Cependant, la production d'azote varie selon les conditions. Les feux couvants libèrent de l'ammoniac, une forme non réactive de l'azote, à partir des plantes. En revanche, les feux plus chauds relâchent de l'oxyde d'azote volatil. «Le piège, c'est que la chimie dans un panache est plutôt intense, explique Matt Coggon. En moins d'une heure dans le cas de grands incendies, cette fumée ne ressemblera plus vraiment à celle qui a été émise au départ.»

Lors de grands incendies, l'oxyde d'azote libéré par la combustion des plantes est entraîné dans la fumée puis poussé dans la troposphère supérieure par la chaleur. Durant cette ascension, certains des composés réagissent jusqu'à ce que, après une cascade de réactions chimiques, l'oxyde d'azote devienne du nitrate de peroxyacétyle $CH_3COO_2NO_2$, une molécule relativement stable quand les températures sont assez fraîches. Tant que la fumée dérive en altitude, à des températures plus fraîches, l'azote est enfermé et le processus de formation d'ozone est essentiellement gelé.

Mais quand la fumée commence à redescendre vers des altitudes où les températures sont plus élevées, le nitrate de peroxyacétyle se dégrade et l'oxyde d'azote fait son retour. Soudainement, à des centaines voire des milliers de kilomètres de l'incendie originel, l'ozone peut se former en quantités toxiques pour les humains. On comprend alors mieux pourquoi, durant certains incendies, les niveaux d'ozone grimpent dans des villes du centre des États-Unis et même de l'est, quand les panaches de fumée nés à l'ouest dérivent vers l'orient. Dans les zones urbaines, dont l'air est déjà riche en oxyde d'azote issu des voitures et des usines, la teneur atmosphérique en ozone peut alors bondir bien au-delà des seuils tolérés. Ce scénario explique comment Seattle a été à plusieurs reprises en 2018 la ville où la qualité de l'air était la pire au monde.

D'autres molécules émises par les incendies se comportent-elles de la même façon que le nitrate de peroxyacétyle? Ce serait le cas des catéchols (la famille du pyrocatéchol cité précédemment) et des composés nitroaromatiques dérivés de ces derniers. Matt Coggon a développé un modèle chimique où ces composés jouent un rôle clé dans le cycle de vie de l'azote et par conséquent dans la formation de l'ozone. De fait, et de façon schématique, «quand ils sont présents, il y a moins d'ozone», résume le chercheur.

Les incendies produisent également des volumes significatifs de ces composés nitroaromatiques. Par conséquent, en modifiant un outil préexistant, un spectromètre de masse, Carsten Warneke et Matt Coggon ont mis au point un appareil pour analyser la concentration de ces molécules dans l'air tous les dixièmes de seconde. Et ils l'ont embarqué à bord du DC-8. C'est cet instrument qui a mis Matt Coggon sur la piste de quelque chose de remarquable.

DES SIGNAUX DANS LA FUMÉE

Une heure et demie après avoir quitté l'incendie de North Hills, dans le Montana, l'avion a rejoint celui de Tucker, près du mont Shasta, en Californie. Quand l'avion est entré dans le panache, la lumière est devenue orange et une odeur de fumée a envahi la cabine.

Matt Coggon fixait l'écran du spectromètre, qui indiquait une très forte concentration de catéchols. «C'est bien plus que ce que nous avons vu il y a deux jours!» a-t-il remarqué. Le spectromètre ne détectait aucun composé nitroaromatique, seulement leurs précurseurs.

EN MOINS D'UNE HEURE, LA COMPOSITION DE LA FUMÉE D'UN GRAND INCENDIE NE RESSEMBLE PLUS VRAIMENT À CELLE QUI A ÉTÉ ÉMISE AU DÉPART

Soudain, il rejoignit Wyatt Brown, un étudiant en train de manipuler un autre instrument qui révélait ce que le spectromètre ne pouvait pas voir: des aérosols submicroniques composés justement de composés nitroaromatiques, en l'occurrence des nitrocatéchols, qui n'étaient donc pas présents sous forme de gaz, mais de fines gouttelettes.

© Matt Nager

Depuis le cockpit du DC-8 de la Nasa, on aperçoit le feu de Ridgetop, dans le Montana.

Matt Coggon avait donc la confirmation, dans le monde réel, de ce qu'il avait vu dans ses modèles. Mais il lui faudra encore du temps pour déterminer si les nitrocatéchols sont un réservoir d'azote qui, comme le nitrate de peroxyacétyle, retarde la production d'ozone, ou bien s'ils le séquestrent de façon permanente, empêchent la production d'ozone. Chaque scénario a des implications importantes sur la production d'ozone à partir de la fumée et, par extension, sur l'impact de cette fumée sur les populations.

De telles énigmes ont été nombreuses durant la campagne. Il y a eu cet incendie d'une maison accidentellement mesuré lors de l'analyse des feux de biomasse dans le Kansas, une étude de cas potentiellement utile au vu du nombre croissant d'infrastructures humaines détruites par les incendies chaque année. Il y a eu aussi ce feu contrôlé de faible intensité dans les pinèdes de Floride qui s'est traduit par une surabondance d'ozone presque immédiatement après l'embrasement, en contraste avec les incendies accidentels dans l'État de Washington semblant n'en produire quasiment pas. Carsten Warneke espère confirmer par l'analyse des données recueillies son explication : le feu de Floride aurait consumé des combustibles riches en azotes, par un jour ensoleillé et avec une fumée basse, tandis que dans l'État de Washington, les réactions chimiques auraient été rendues impossibles par la densité de la colonne de fumée empêchant la lumière du soleil d'y pénétrer.

L'élément le plus problématique réside peut-être dans la formation secondaire de PM 2,5. Lors de plusieurs incendies, la quantité de ces particules fines a diminué avant de croître rapidement. Les processus observés en laboratoire étaient-ils à l'œuvre dans la nature ?

L'HEURE DU BAIN

Après une heure passée dans le panache de fumée de l'incendie de Tucker, le soleil a décliné derrière l'océan Pacifique. Par le hublot, le feu était encore visible au sol, comme un long ruban orange serpentant dans le noir. Le DC-8 n'avait presque plus de carburant. Les pilotes entamèrent un virage vers l'est, en direction de Boise, et Jim Crawford a rejoint la cabine. « Du point de vue des émissions, ce n'était qu'une goutte dans l'océan, expliqua-t-il. Mais les détails que nous pourrons en tirer seront très précieux. »

Bientôt, les scientifiques se tourneront vers une tâche moins excitante : organiser les données, préparer des articles, mettre au point des outils de modélisation et de prévision… Mais, cette nuit, baignant dans une odeur de fumée, tous se sont serré la main en se félicitant. Et quelqu'un a suggéré un bain pour toute l'équipe. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. AKHERATI *ET AL.*, Oxygenated aromatic compounds are important precursors of secondary organic aerosol in biomass-burning emissions, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54(14), pp. 8568-8579, 2020.

M. PRUNICKI *ET AL.*, The impact of prescribed fire versus wildfire on the immune and cardiovascular systems of children, *Allergy*, vol. 74(10), pp. 1989-1991, 2019.

C. MCCLURE ET D. JAFFE, U.S. particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas, *PNAS*, vol. 115(31), pp. 7901-7906, 2018.

K. DICKMAN, *On the Burning Edge*, Ballantine Books, 2015.

S. PYNE, *Between Two Fires: A Fire History of Contemporary America*, Univ. of Arizona Press, 2015.

L'ESSENTIEL

- Les vents, les pluies et les vagues associés aux cyclones ont un impact destructeur majeur sur les infrastructures et les écosystèmes.
- Les principaux mécanismes de formation des cyclones sont assez bien compris. Des progrès technologiques récents offrent la perspective d'une compréhension plus fine des processus d'intensification et de formation de l'œil.
- Les épisodes cycloniques semblent de plus en plus nombreux et destructeurs, une impression en partie biaisée par l'amélioration de la surveillance satellite et par la densification des aménagements littoraux.
- Néanmoins, le changement climatique semble favoriser la formation d'ouragans puissants et accroître leur dangerosité.

LES AUTEURS

EMMANUEL DORMY
directeur de recherche du CNRS, professeur à l'École normale supérieure et à Sciences Po, à Paris

LUDIVINE ORUBA
maîtresse de conférences à Sorbonne Université, au Laboratoire atmosphères, milieux et observations spatiales, à Paris

Des cyclones plus destructeurs ?

Katrina, Idai, Harvey... Ces dernières décennies, de nombreux ouragans ont semé le chaos sur leur passage. La fréquence et la violence de ces terribles tempêtes semblent augmenter.

Ouragans dans l'Atlantique nord, typhons dans le nord-ouest du Pacifique ou encore cyclones tropicaux dans l'océan Indien, tous ces termes désignent le même phénomène météorologique, parmi les plus spectaculaires et les plus destructeurs de la planète. Lorsqu'un cyclone se forme, c'est la dynamique atmosphérique qui s'emballe, s'amplifie et finit par libérer des quantités gigantesques d'énergie. Les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure, soit la vitesse d'un TGV. Des débris de toutes sortes (morceaux de bois, tôles) deviennent alors autant de projectiles menaçants. Mais ces effets dévastateurs ne sont rien en comparaison de ceux que provoquent les fortes précipitations et les crues de plusieurs mètres de hauteur qui accompagnent le phénomène.

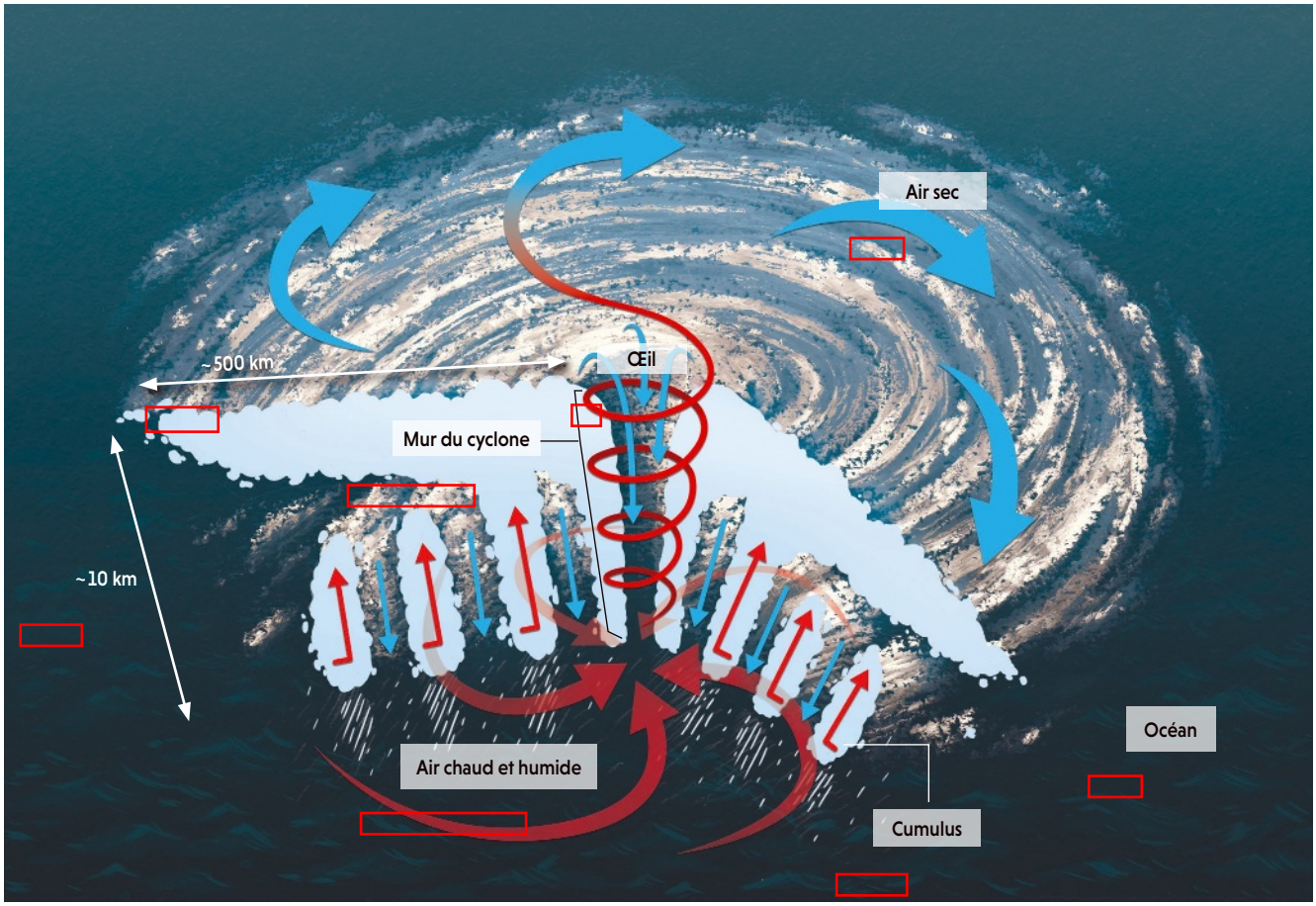
Ainsi, en 2005, le cyclone Katrina a complètement inondé La Nouvelle-Orléans et ses environs. Le bilan s'est élevé à 1800 morts et les dégâts ont été chiffrés à 108 milliards de dollars. Plus récemment, en 2019, le cyclone Idai a touché les côtes du Mozambique, où il a déversé des trombes d'eau qui ont coûté la vie à plus de 1000 personnes. Mais ces deux cyclones ne font pas figure d'exceptions. Chaque année, ils sont plusieurs à ravager les régions qu'ils traversent.

La menace que les ouragans font peser sur les populations côtières et l'impact financier qu'ils représentent incite à les surveiller de près et à comprendre comment ce phénomène prend forme, se développe et évolue. L'un des objectifs est d'anticiper leur arrivée pour limiter les dégâts qu'ils provoquent et mettre les habitants à l'abri. Les données toujours plus complètes et précises révèlent cependant une tendance alarmante : l'effet destructeur des cyclones semble être à la hausse au cours de ces dernières décennies. Ce constat est-il réel ou le résultat de biais observationnels ?

DES SATELLITES DE SURVEILLANCE

Pendant longtemps, les seuls témoins de ce phénomène ont été les marins et les populations vivant dans les régions touchées par les cyclones. Les premières descriptions consignées par écrit datent du XVII^e^ siècle. Ainsi, vers 1650, le géographe allemand Bernhardus Varenius s'est intéressé aux tempêtes tropicales et a dépeint les cyclones comme des tourbillons. Mais c'est au XIX^e^ siècle que leur suivi scientifique a vraiment commencé, sous l'impulsion notamment de Henry Piddington, capitaine de la marine marchande britannique. On lui doit le terme de «cyclone», du grec *kyklos*, la roue ou le cercle. Puis, au cours du XX^e^ siècle, les techniques d'observation se sont nettement enrichies, en particulier grâce aux satellites météorologiques à partir des années 1970. Enfin, en 2017, la Nasa a lancé la constellation *CYGNSS* (*Cyclone Global Navigation Satellite System*), dédiée spécifiquement à la surveillance des cyclones. Cette dernière est parfois complétée avec l'utilisation d'avions ou, depuis une dizaine d'années, de drones qui effectuent des vols de reconnaissance à l'intérieur même des cyclones.

LE BILAN DE KATRINA S'ÉLÈVE À 1800 MORTS ET LES DÉGÂTS SE CHIFFRENT À 108 MILLIARDS DE DOLLARS



Un cyclone est avant tout alimenté par l'air chaud et humide qui s'élève depuis la surface de l'océan. La condensation de l'air apporte des précipitations et un supplément de chaleur. Le système s'emballe et les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure. La force de Coriolis due à la rotation de la Terre imprime un mouvement tournant au cyclone. Au centre, une zone calme se forme, c'est l'œil du cyclone.

Cette amélioration des techniques de suivi permet l'étude de cyclones qui seraient autrefois passés inaperçus. Les satellites détectent par exemple des ouragans qui se forment en mer, mais diminuent d'intensité ou disparaissent avant de toucher les côtes. Un autre facteur important a contribué à l'impression qu'il y a davantage de cyclones : la population côtière. Plus de 20 % de la population mondiale vit actuellement à moins de 30 kilomètres des côtes et ce chiffre ne fait qu'augmenter. Il y a donc plus de risques qu'un cyclone frappe une zone habitée et provoque de nombreux dommages.

Mais la meilleure surveillance et la répartition de la population ne suffisent pas à expliquer l'augmentation de la dangerosité des ouragans. Les simulations numériques, qui ont connu de substantielles améliorations ces dernières décennies grâce à l'utilisation d'ordinateurs de plus en plus puissants, prévoient une croissance de l'intensité des cyclones dans le contexte d'un changement climatique lié aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Pour appréhender cette évolution conjointe des cyclones et du climat, il faut d'abord comprendre les mécanismes qui confèrent autant d'énergie à ce phénomène et rendent les cyclones si dangereux. Le point de départ se situe dans les océans tropicaux, qui accumulent l'énergie du rayonnement solaire sous la forme de chaleur. La température de l'eau de surface peut atteindre 30 °C à la fin de l'été. Cette couche d'eau chaude s'étend en profondeur, sur des épaisseurs allant de quelques mètres à près d'une centaine de mètres. Elle représente un formidable réservoir d'énergie susceptible d'être transmis à l'atmosphère.

Ce transfert se fait en premier lieu par conduction thermique : l'eau de surface chauffe l'air juste au-dessus. Le gaz à la base de l'atmosphère se dilate et devient plus léger que l'air environnant. En vertu de la poussée d'Archimède, il subit une force l'entraînant vers le haut. Un second effet, plus subtil, vient renforcer ce mouvement : l'évaporation. L'air chaud est capable d'absorber une quantité plus importante de vapeur d'eau que l'air froid (le linge sèche plus vite en été !). Or la vapeur d'eau pèse moins lourd que l'air sec. Les deux effets se renforcent, de sorte que l'air chaud et humide s'élève vers des couches plus hautes de l'atmosphère. L'énergie thermique se transforme ainsi en énergie cinétique : des courants ascendants apparaissent. Ce phénomène est à l'origine de la formation des cumulus, ces gros nuages blancs fréquents sous les tropiques. >

© Marie Marty

Quand les bonnes conditions sont réunies, ce puissant panache ascendant est encore renforcé par un autre ingrédient : la pluie. Lorsque l'air chaud et humide est entraîné rapidement en altitude, il se refroidit. Il ne peut plus alors contenir autant de vapeur d'eau, celle-ci se condense et de la pluie se forme. Les volumes de vapeur d'eau impliqués dans ce processus sont très importants. Or la condensation des gouttelettes libère de la chaleur, car il s'agit d'un changement de phase exothermique (c'est le processus inverse de l'évaporation : lorsqu'on porte un vêtement mouillé en plein été, l'évaporation refroidit celui-ci). Ainsi, avec la formation de la pluie, l'air se réchauffe davantage et monte d'autant plus vite : la machine atmosphérique s'emballe !

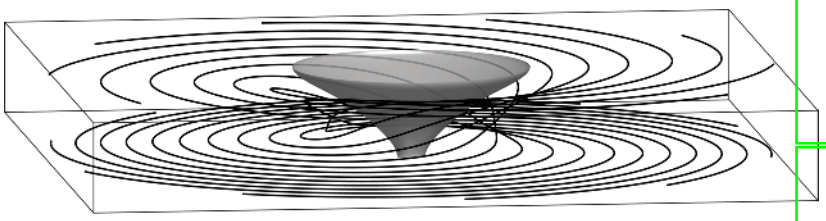
CYCLONE ET BAIGNOIRE

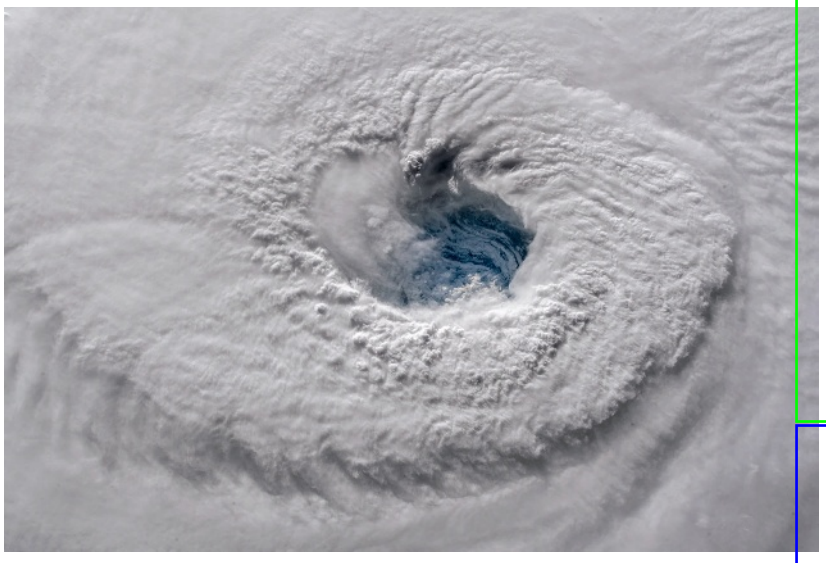
Ces courants d'air ascendants ne constituent pas encore des cyclones. Il faut y ajouter un nouvel acteur, la force de Coriolis. Le courant vertical d'air chaud et humide crée une zone de dépression à sa base vers laquelle de grandes masses d'air convergent horizontalement. Ce problème rappelle celui de la baignoire qui se vide. Un flux horizontal se met en place pour remplacer l'eau évacuée par le siphon. On remarque que le courant ne s'écoule pas en ligne droite : le liquide forme un tourbillon autour du trou de la baignoire. Cela tient à la conservation du moment cinétique, une propriété liée au fait que les lois de la physique sont invariantes par rotation dans l'espace. Pour la même raison que les patineurs tournent plus vite sur eux-mêmes lorsqu'ils ramènent les bras le long du corps, un mouvement résiduel de l'eau presque invisible à l'échelle du bain s'amplifie quand le liquide s'approche du siphon. La vitesse de rotation de l'eau autour de l'axe du siphon augmente à mesure que le fluide se rapproche du trou d'évacuation. La conservation du moment cinétique est le seul effet qui compte à l'échelle d'une baignoire. Ainsi, le sens de rotation ne dépend pas de l'hémisphère où l'on se trouve (contrairement à ce que l'on peut parfois entendre).

En revanche, à l'échelle de l'atmosphère, la rotation de la Terre sur elle-même influe sur les mouvements des masses d'air. C'est la « force » de Coriolis (en toute rigueur, il s'agit d'une pseudoforce, car elle est due à la rotation du référentiel dans lequel on étudie le phénomène, la Terre, et non à l'action d'un corps sur un autre). Inefficace à petite échelle, la force de Coriolis devient prépondérante pour dévier les masses d'air de l'atmosphère qui convergent vers une zone de dépression. Ces courants dévient et tournent toujours dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens opposé dans l'hémisphère Nord. La forme des cyclones commence à se dessiner.

Point crucial, la force de Coriolis est maximale au pôle Nord et diminue jusqu'à s'annuler à l'équateur, puis elle change de sens quand on passe dans l'hémisphère Sud et atteint de nouveau un maximum au pôle austral. Les latitudes les plus élevées semblent donc favorables à la formation des cyclones, mais il faut aussi prendre en compte la température des océans. En général, on estime qu'une température minimale de 26 °C fournit une réserve énergétique suffisante pour amorcer un cyclone. Ces conditions sont obtenues au plus près de l'équateur, où la force de Coriolis est à l'inverse la plus faible. En pratique, le meilleur compromis conduit à la naissance des cyclones dans deux bandes comprises entre 10 et 30° de latitude, de part et d'autre de l'équateur.

Une fois formé, un ouragan ne reste pas en place. Il dérive d'une part à cause des vents environnants (associés à la circulation atmosphérique de grande échelle), d'autre part à cause de la force de Coriolis. Comme cette dernière varie avec la latitude, elle ne s'applique pas de la même façon en tout point du cyclone. Conséquence : en l'absence de vents environnants, le cyclone tend à se déplacer vers l'ouest et vers les pôles. L'ouragan persiste au plus





© L. Oruba et E. Dormy (simulation) ; Nasa (photo)

Au centre d'un cyclone se forme généralement un œil, une zone dépourvue de nuages et de vents *(comme ci-dessus pour l'ouragan Florence en 2018)*. Les auteurs de l'article ont modélisé comment les vents se soulèvent de la surface à l'approche de l'axe du cyclone et s'en écartent en s'élevant *(en haut)*. Ils montrent ainsi comment se forme le mur qui entoure l'œil du cyclone.

UN MONSTRE MÉTÉOROLOGIQUE

Les cyclones comptent parmi les événements extrêmes les plus dévastateurs. Même si ce n'est peut-être pas la meilleure façon d'évaluer leurs impacts, on peut noter qu'ils ont entraîné en 2017 dans le bassin Atlantique plusieurs centaines de milliards d'euros de dégâts. Ils ont également causé la disparition de plusieurs milliers de personnes.

Les cyclones accumulent une puissance extraordinaire, car ils sont de formidables machines à transformer l'énergie thermique emmagasinée à la surface des océans en vents violents et en pluie. Pour un cyclone moyen, d'un rayon de 200 kilomètres, entraînant 10 centimètres de pluie par jour, la puissance libérée par la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau qui s'élève de la mer peut être estimée à environ 10^{14} watts. Ce chiffre impressionnant doit cependant être considéré avec prudence, car seule une petite fraction de cette énergie thermique sera effectivement convertie en vents. Pour ce même cyclone, en considérant des vents soufflant à 180 kilomètres par heure à 30 kilomètres du centre du cyclone, seuls 10^{12} watts sont nécessaires pour soutenir ces vents. À titre de comparaison, la puissance de production électrique totale de la France s'élève à environ 6×10^{10} watts. Il faut considérer la production mondiale (3×10^{12} watts) pour atteindre l'ordre de grandeur du cyclone considéré ici.

Les vents d'un cyclone peuvent atteindre 300 kilomètres par heure. Ils mettent à l'épreuve les infrastructures et transforment en projectiles les morceaux de bois, plaques de tôles et autres débris. On utilise d'ailleurs l'intensité des vents pour classer les cyclones selon l'échelle de Saffir-Simpson (voir le tableau). Dans l'Atlantique nord, 14 ouragans de catégorie 5 ont déjà été observés au XXIe siècle, dont 8 ont dépassé les 280 kilomètres par heure. Les vents sont mesurés à 10 mètres au-dessus du sol et doivent être soutenus sur une minute (on parle de «vents soutenus»). Cette grandeur ne mesure pas nécessairement l'importance des dégâts causés. En 2017, par exemple, le cyclone Harvey a entraîné des inondations sans précédent qui ont provoqué des dégâts importants au Texas, bien qu'il n'ait atteint «que» la catégorie 4 en touchant les terres et qu'il ait rapidement été rétrogradé au stade de tempête tropicale.

Plusieurs effets se combinent pour créer ces inondations dévastatrices. Tout d'abord, le cyclone étant une dépression (l'air léger ascendant crée une baisse de la pression atmosphérique en surface), le niveau de l'océan monte. De façon imagée, l'eau est aspirée par la baisse de pression. Ensuite, les vents violents du cyclone déplacent des masses d'eau importantes, parfois vers les terres. Ils entraînent aussi des vagues d'amplitudes exceptionnelles. Enfin, les pluies associées à la condensation de l'humidité des océans sont torrentielles. Pour s'en donner une idée, plus de 1 mètre d'eau peut tomber en seulement 12 heures sous un cyclone tropical intense. À titre de comparaison, la pluie apporte en moyenne un peu moins de 1,5 mètre d'eau à Biarritz sur une année entière, le record en France métropolitaine.

L'eau et le vent d'un cyclone occasionnent de très nombreux dégâts, à l'image de ceux observés à la Nouvelle-Orléans, aux États-Unis, après le passage de Katrina en 2005 *(en haut)*, et dans la région de Beira, au Mozambique, touchée par le cyclone Idai, en 2019 *(en bas)*.

Catégorie	Vitesse des vents soutenus (km/h)
Dépression tropicale	< 63
Tempête tropicale	63-118
Cyclone de catégorie 1	119-153
Cyclone de catégorie 2	154-177
Cyclone de catégorie 3	178-208
Cyclone de catégorie 4	209-251
Cyclone de catégorie 5	> 252

L'échelle la plus utilisée pour définir l'intensité d'un cyclone est celle de Saffir-Simpson (du nom de Herbert Saffir, ingénieur civil, et Robert Simpson, alors directeur du NHC, le centre américain des cyclones, à Miami). Les cyclones sont classés en 5 catégories en fonction de la violence de leurs vents.

En haut : © Shutterstock.com/StratosBril ; en bas : © Shutterstock.com/fivepointsix

quelques semaines avant d'atteindre des terres. Lorsque celles-ci sont habitées, les dégâts sont impressionnants (*voir l'encadré page précédente*). Même lorsqu'elles ne le sont pas, la flore et la faune sont largement détruites. Les récifs coralliens, par exemple, mettent plusieurs années à se reconstruire après le passage d'un cyclone (*voir l'encadré ci-dessous*).

LA MORT D'UN CYCLONE

Mais privé d'un océan chaud et de l'évaporation associée, le « moteur » de l'ouragan finit par caler. Certains peuvent malgré tout se manifester encore plusieurs jours après avoir touché terre. Ce fut le cas notamment du cyclone Harvey en 2017, qui déversa des pluies diluviennes sur les côtes du Texas pendant cinq jours consécutifs.

En dérivant vers des latitudes plus élevées, le cyclone peut aussi rencontrer des eaux plus froides. Il perd alors en puissance et se transforme en tempête, à l'image du cyclone Ophelia, qui, en 2017, n'était plus qu'une tempête, dite « tempête des moyennes latitudes », en arrivant sur les côtes de l'Irlande.

Un troisième mécanisme peut mettre fin à un ouragan : les vents d'altitude. Si ces vents sont plus forts que les vents de surface, ils « cisaillent » les cyclones, voire bloquent leur formation. Ces vents tendent à incliner les ouragans et le mécanisme d'intensification perd en efficacité. Ils agissent comme un véritable frein. Certaines régions du globe soumises à ces vents d'altitude, telles Hawaii ou la Polynésie française, subissent en pratique moins de cyclones qu'elles ne le devraient si l'on se fie uniquement à la température de surface des océans.

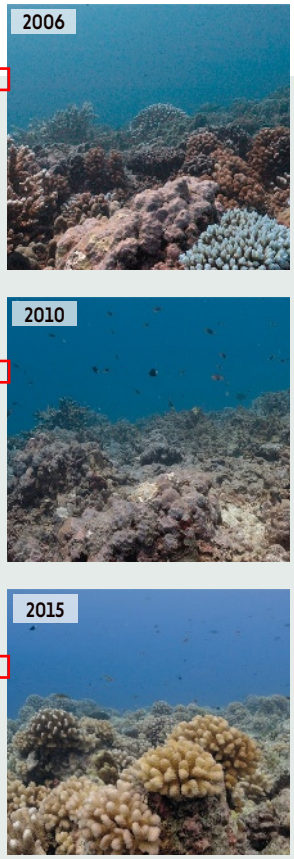
On explique donc relativement bien la dynamique des cyclones de leur naissance à leur mort. Cependant, certains aspects restent encore mal compris et font l'objet de discussions parmi les spécialistes. Par exemple, il ne suffit pas que l'air soit chaud et humide à la surface de l'océan pour qu'un cyclone se forme. Le mécanisme qui conduit à une élévation de cet air correspond à une instabilité dite « linéaire » (ou « supercritique »), car elle croît à partir d'une perturbation, aussi petite soit-elle (c'est par exemple le cas de l'effet Larsen, un micro orienté vers un haut-parleur amplifie un son initialement inaudible qui devient un sifflement strident). En général, cette instabilité linéaire entraîne simplement la formation de cumulus, qui se transforment à terme en orages. Pour déclencher la formation d'un cyclone, il faut que certaines conditions supplémentaires soient remplies. On parle alors d'une instabilité non linéaire (ou sous-critique), car une perturbation assez grande est nécessaire pour amorcer le phénomène, de la même façon qu'on utilise un démarreur électrique pour lancer le moteur thermique d'une voiture.

LA RÉSILIENCE DES CORAUX

Les cyclones ne frappent pas uniquement les habitants et les infrastructures. Ils ont aussi un fort impact sur la nature. Par exemple, Yannick Chancerelle, du Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement, a étudié l'impact sur les coraux du cyclone Oli, de catégorie 4, qui a frappé l'île de Moorea, en Polynésie française, en 2010. Le récif, déjà affaibli par les effets du réchauffement climatique et l'augmentation de la température des océans, a été largement détruit. Dans un paysage lunaire, plus une seule colonie corallienne n'était visible. En passant, le cyclone a détaché de gros blocs de corail qui ont « raboté » le fond. Une technique utilisée d'ailleurs ce genre de débris de coraux pour dater de façon indirecte (par datation isotopique, radiocarbone, etc.) des épisodes cycloniques du passé (on parle de paléocyclones) qui ne peuvent être documentés autrement.

Dans le cadre d'un suivi systématique du récif, Yannick Chancerelle a photographié un site précis du récif par 10 mètres de profondeur, sur le tombant externe de l'île. Grâce à des conditions favorables à la croissance des coraux, ces derniers se sont reconstruits rapidement, en quelques années, après le passage d'Oli. On parle alors de résilience : on assiste à un véritable feu d'artifice de corail. Après ces prises de vues, ce récif a malheureusement connu un épisode de blanchiment majeur en 2019, probablement lié au réchauffement.

Soumis à la pression anthropique directe (pollution des côtes), au réchauffement climatique et à la colère des cyclones, ces systèmes sont particulièrement exposés. Si leur résilience leur permet de se reconstruire après des événements extrêmes de courte durée, leur capacité à survivre à des modifications durables du climat est malheureusement des plus incertaines.



Le même récif corallien a été photographié en 2006, avant le passage du cyclone Oli, en 2010, quelques jours après le passage d'Oli, et en 2015. Après avoir été détruits, les coraux se sont reconstitués en quelques années.

© Y. Chancerelle/CRIOBE/SNO CORAIL

Dans le cas des cyclones, il faut une organisation particulière des vents pour entraîner le système. Ces conditions sont encore assez mal connues, même si l'on sait, par exemple, que des perturbations de la circulation atmosphérique, nommées « ondes africaines d'est », contribuent à la naissance des ouragans dans l'océan Atlantique. Ces ondes sont engendrées en Afrique du nord puis se propagent vers l'ouest en direction des Caraïbes.

Dès les années 1960, les chercheurs ont essayé de comprendre les dessous du processus d'intensification qui permet de basculer du stade de tempête à celui du cyclone tropical. L'un des premiers mécanismes proposés, CISK, repose sur l'existence d'une convergence de vents à grande échelle vers le centre dépressionnaire. Dans les années 1980-1990, Kerry Emanuel, du MIT, a proposé un autre modèle en introduisant la théorie WISHE, qui repose sur un élément clé : l'action de vents forts permettant une évaporation plus importante à la surface de l'océan. Plus les vents soufflent fort, plus l'évaporation est efficace – un mécanisme qui renforce les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère.

Enfin, grâce à des simulations numériques tridimensionnelles, Michael Montgomery, de la Naval postgraduate school, en Californie, et Roger Smith, de l'université de Munich, ont mis en évidence l'importance de structures atmosphériques tridimensionnelles que l'on appelle des « tours de convection ». Elles joueraient un rôle essentiel dans l'intensification du cyclone global en renforçant les vents de sa structure. Le mécanisme d'intensification est encore très débattu au sein de la communauté scientifique. Il faut surtout retenir que ce sont les vents préexistants qui déterminent l'évolution, ou non, vers un cyclone tropical.

LE CALME AU MILIEU DE LA TEMPÊTE

La formation de l'œil du cyclone est un autre aspect qui fait toujours l'objet de recherches. La région centrale du cyclone, de forme conique, constitue sa caractéristique la plus étonnante : souvent visible depuis l'espace, contenant peu ou pas de nuages, cette zone jouit d'un calme absolu au milieu de la tempête (*voir la figure page 72*). Cela est d'autant plus surprenant que lorsqu'on se rapproche de cette région, les vents se font de plus en plus intenses. On atteint alors le « mur », où les vents dépassent parfois 300 kilomètres par heure et où les pluies sont les plus intenses. Mais dès que le mur est franchi, on entre dans l'œil du cyclone, dont le diamètre est d'environ 50 kilomètres. Le ciel devient bleu, la pluie et les vents cessent. En 2010, lors du passage du cyclone Oli, de catégorie 4, les habitants de la petite île française de Tubuai, dans l'océan Pacifique sud, ont vécu ce moment de répit dans l'œil du cyclone. Mais le calme n'est que de courte durée. En quelques heures, on se retrouve de l'autre côté de l'œil où l'on franchit à nouveau le mur. Les vents sont immédiatement très violents et soufflent dans le sens opposé !

Les mécanismes responsables de la formation de l'œil et du mur qui l'enveloppe restent mal compris et très controversés. L'une des explications le plus souvent avancées repose sur la libération de chaleur latente. L'air humide monte dans le mur avant d'arriver au centre du cyclone ; il libère sa chaleur et renforce ainsi le mur. Devenu froid et sec, l'air redescend alors le long de l'axe ; on parle de subsidence. Par conséquent, sans humidité présente, l'œil est souvent dépourvu de nuages. Mais ce mécanisme avancé dans les années 1980 est avant tout une description phénoménologique de ce qui se passe et suppose déjà l'existence du mur. Il n'explique donc pas la formation de l'œil. Par ailleurs, plusieurs simulations numériques ont montré que l'œil se forme même en l'absence de condensation et de libération de chaleur latente.

En 2018, nous avons proposé un mécanisme reposant sur l'extraction de tourbillons de la couche limite atmosphérique. L'air qui converge vers la zone de dépression est doté de deux mouvements propres : il tourne autour du centre de la dépression à cause de la force de Coriolis (on parle de « vorticité axiale ») et il spirale sur lui-même dans un plan perpendiculaire à ce premier mouvement (on parle de « vorticité azimutale »). Lorsque cet air quitte la surface de l'océan pour s'élever en altitude, il conserve ces deux vorticités. La vorticité azimutale conduit le vent à s'écarter de l'axe alors qu'il monte. On obtient ainsi la forme conique de l'œil. Et, simultanément, cette vorticité entraîne l'air sec d'altitude vers le sol au centre du cyclone, comme observé. Le modèle s'appuie sur un système simplifié afin de bien comprendre les phénomènes en jeu. Des simulations numériques plus réalistes sont en cours pour confirmer ce scénario.

Malgré ces inconnues, les spécialistes tentent déjà de comprendre comment les cyclones évoluent dans un contexte de changement climatique. Ce dernier se traduit en particulier par une hausse des températures océaniques et une élévation du niveau des océans (due à la fonte des calottes antarctique et groenlandaise, mais aussi à la dilatation thermique de l'eau des océans). Par exemple, Ben Santer, du laboratoire américain Lawrence-Livermore, et ses collègues ont montré en 2006 que dans les >

NOMS DE CYCLONES

Les marins donnaient autrefois des prénoms surtout féminins aux cyclones. Depuis les années 1970 et le mouvement féministe aux États-Unis, un ouragan sur deux porte un prénom masculin. Le centre américain des cyclones, à Miami, établit six listes de noms suivant les lettres de l'alphabet pour six années consécutives et réutilisées par la suite. Lorsqu'un ouragan est particulièrement dévastateur, son nom est remplacé dans la liste (« Harvey » a été remplacé, après 2017, par « Harold »). Seules deux lettres manquent à la liste : Q et U, par manque d'imagination. Il n'y a donc pas à craindre de cyclones Quentin ou Ursula ! En 2020, pour la deuxième fois après 2005, la liste a été épuisée. On utilise alors l'alphabet grec pour nommer les cyclones.

Le XXIe siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5

régions tropicales de l'Atlantique et du Pacifique, la température de surface de l'océan avait augmenté d'entre 0,3 et 0,6 °C au cours du XXe siècle. L'accumulation de chaleur dans le système implique que les océans transfèrent davantage d'énergie à l'atmosphère. Or une hausse de 1 °C de la température de l'atmosphère permet une augmentation de 8% d'humidité dans l'air. C'est autant d'énergie supplémentaire disponible pour les cyclones.

Un océan plus chaud semble donc mener naturellement à des cyclones plus fréquents et plus intenses. Justement, ces dernières années ont été marquées par de nombreux cyclones exceptionnels. Le XXIe siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5, près de la moitié du nombre observé sur la totalité du siècle précédent. Par exemple, les saisons cycloniques 2005 et 2020 ont battu des records en termes de nombre d'ouragans (la liste est allée jusqu'à « Epsilon » en 2005 et inclut notamment Katrina et Rita ; la saison 2020, alors qu'elle n'est pas terminée, en était déjà à l'ouragan « Êta » au 1er novembre). Ces dernières années ont aussi été marquées par des ouragans exceptionnels : par exemple Haiyan en 2013, Patricia en 2015, Irma et Maria en 2017 ou Dorian en 2019 se sont distingués par l'intensité de leurs vents, et Harvey en 2017 a marqué les esprits avec ses pluies torrentielles. Ces cas récents renforcent l'impression que les cyclones destructeurs sont de plus en plus puissants et davantage fréquents. Pourtant, le lien entre

UN MONDE SANS CYCLONES ?

Devant les destructions impressionnantes causées par les cyclones à travers le monde, certains scientifiques ont imaginé des stratégies pour les inhiber. L'énergie cinétique d'un cyclone moyen représente 10 000 fois celle libérée par la bombe atomique d'Hiroshima et dépasse même l'énergie de la bombe nucléaire la plus puissante jamais testée sur Terre. Une telle arme aurait donc peu de chances de détruire un cyclone, mais c'est pourtant l'idée saugrenue émise en 1945 par le maire de Miami de l'époque, Herbert Frink, au président Truman. Heureusement, cette piste ne fut pas poursuivie ! D'autres idées plus ou moins réalistes ont par la suite été envisagées.

En 1966, les météorologues américains Joanne et Robert Simpson (de l'échelle Saffir-Simpson) ont proposé de recouvrir l'océan près d'un cyclone naissant d'une couche d'un fluide immiscible et plus léger, comme des hydrocarbures ou des huiles, afin d'empêcher l'évaporation. En 2005, Grigory Barenblatt et Alexandre Chorin, deux mathématiciens de l'université de Californie à Berkeley, et un collègue ont repris cette idée en suggérant d'utiliser un tensioactif – la tension de surface étant nécessaire à la formation de gouttelettes à la surface de l'océan. Selon leur idée, empêcher la formation de ces gouttelettes faciliterait le développement de turbulences dans le vent qui inhiberaient à leur tour la formation du cyclone.

En 1976, des chercheurs de l'université d'État du Colorado ont proposé d'utiliser de la suie en grande quantité afin de perturber l'équilibre thermique du cyclone. La suie aurait été produite en brûlant des hydrocarbures en périphérie du cyclone…

Un autre projet a quant à lui été mené de façon très sérieuse par les États-Unis pendant dix ans, de 1961 à 1971 : le projet Stormfury. Il consistait à envoyer un avion traverser un cyclone actif pour l'ensemencer d'iodure d'argent. Ce projet reposait sur l'idée que l'iodure d'argent servirait de graine pour amorcer la solidification de l'eau en surfusion et permettrait ainsi de modifier la structure du cyclone en libérant une partie de la chaleur latente de liquéfaction à l'extérieur du mur de l'œil. Il a été abandonné dans les années 1970 par manque de résultats.

Il y a une dizaine d'années, le projet Salter Sink visait à installer des pompes près des côtes menacées : ces pompes devaient exploiter l'énergie fournie par la houle pour injecter l'eau chaude de surface vers les profondeurs. Par mélange, cela aurait refroidi la surface de l'océan. Enfin, un projet récemment porté par la société norvégienne OceanTherm propose d'immerger des tuyaux percés au fond de l'océan. En faisant circuler de l'air dans ceux-ci, on créerait un rideau de bulles qui entraînerait vers la surface les eaux froides des profondeurs. Comme dans le projet Salter Sink, l'objectif est ici de refroidir les eaux de surface afin de réduire l'énergie disponible pour les cyclones. Dans ces scénarios, le surplus d'énergie thermique emmagasiné en surface se trouverait absorbé par l'océan plutôt que par l'atmosphère…

Les conséquences d'une telle modification des flux d'énergie restent à évaluer.

L'équipe du projet *Stormfury* en 1966. L'avion était utilisé pour disperser de l'iodure d'argent afin de perturber la dynamique des cyclones. Le projet n'a pas été concluant.

© NOAA

l'intensification ou la fréquence des cyclones et le réchauffement climatique n'est pas aussi simple. L'augmentation de la température moyenne des océans ne modifie pas systématiquement à la hausse la fréquence et l'intensité des ouragans : l'année 2006 a, au contraire, été l'occasion d'une accalmie bienvenue.

Depuis trente ans, les études théoriques et les simulations numériques prévoient que l'intensité des cyclones devrait augmenter, mais pas nécessairement leur fréquence. La question est restée longtemps débattue, car les données observationnelles et la précision des modèles étaient insuffisantes pour conclure. Il fallait d'une part disposer de résultats statistiquement robustes et d'autre part pouvoir corriger certains biais dans les données : la détection plus efficace de cyclones grâce à l'amélioration des techniques, une population plus importante exposée aux risques cycloniques, ou encore l'influence des oscillations naturelles du climat – des cycles quasi périodiques de variations locales de température de surface de la mer, de la température de l'atmosphère ou des précipitations, par exemple.

L'INFLUENCE D'EL NIÑO

Mais ces dernières années, les simulations numériques ont joué un grand rôle pour démêler ces phénomènes. Notamment, elles ont souligné l'importance des oscillations naturelles du climat. L'impact de ces oscillations, souvent localisées dans une région donnée, peut s'étendre à la planète entière en influant sur la circulation atmosphérique globale. La plus connue du grand public est probablement l'ENSO (El Niño Southern Oscillation) dans le Pacifique équatorial. Elle se traduit notamment par une oscillation de la température de surface de l'océan au large du Pérou : dans la phase El Niño, la température y est maximale, et c'est le contraire pendant la phase La Niña.

El Niño renforce les vents d'altitude qui soufflent au-dessus de l'Atlantique. Le phénomène de cisaillement associé à ces vents inhibe alors la formation d'ouragans. L'automne 2020, par exemple, est caractérisé par une phase La Niña : un faible cisaillement de vent a permis une saison cyclonique très intense dans l'Atlantique nord. Depuis quelques années, plusieurs organismes émettent des prévisions sur l'intensité d'une saison cyclonique en prenant en compte, entre autres, les oscillations naturelles du climat. Ils avaient ainsi anticipé la saison 2020, particulièrement active dans l'Atlantique nord.

La prise en compte de ces facteurs a permis d'affiner les modèles questionnant le lien entre changement climatique et cyclones. Dans trois études parues en 2020, Kerry Emanuel, l'équipe de Thomas Knutson, de l'université de Princeton, et celle de James Kossin, de la NOAA (l'agence nord-américaine de météorologie) ont confirmé que la hausse de la température moyenne n'augmente pas nécessairement la fréquence des cyclones tropicaux. En revanche, la fraction de cyclones les plus forts est plus élevée. À ce phénomène d'intensification s'ajoutent diverses évolutions confirmées ou encore débattues qui pourraient contribuer à rendre les cyclones plus destructeurs : la hausse du niveau des océans accroît les risques d'inondation, la saison cyclonique pourrait s'allonger, les cyclones pourraient ralentir…

LES PRÉVISIONNISTES AVAIENT ANTICIPÉ UNE SAISON 2020 TRÈS ACTIVE DANS L'ATLANTIQUE NORD

Ce dernier point a été soulevé par James Kossin en 2018. En compilant des données acquises depuis la fin des années 1940, ce chercheur a suggéré que la vitesse moyenne de déplacement des cyclones avait diminué d'environ 10 %. Ce ralentissement, s'il se confirme, implique qu'un cyclone déverse davantage d'eau et souffle plus longtemps à l'endroit où il rencontre la terre ferme. Les risques de crues augmentent et les vents forts infligent d'autant plus de dégâts. L'origine d'un tel ralentissement est encore mal comprise. Les liens entre les propriétés des cyclones et le climat sont loin d'être tous identifiés.

Devant un tel danger, il est évidemment tentant de chercher des solutions pour essayer d'empêcher la formation des cyclones, voire pour les détruire. Plusieurs approches ont déjà été envisagées (*voir l'encadré page ci-contre*), pour l'instant sans grand succès. Outre les conséquences écologiques, parfois terribles, de certains de ces projets (il serait probablement difficile aujourd'hui d'envisager de répandre volontairement et massivement des hydrocarbures sur l'océan voire de l'iodure d'argent ou de la suie dans l'atmosphère), il convient de se demander : peut-on vraiment envisager une Terre sans cyclones ?

Aussi loin que l'on remonte par des observations indirectes, les cyclones ont toujours frappé la Terre (certaines données semblent même indiquer qu'ils existaient déjà au Crétacé). Ils sont une partie intégrante du climat de notre planète, qu'ils contribuent à réguler : ils déplacent de grandes quantités d'énergie des océans surchauffés vers les latitudes plus élevées. Il est difficile d'estimer quelles seraient les conséquences sur le climat si un jour l'humanité arrivait à les contrôler. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. KOSSIN *ET AL.*, Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades, *PNAS*, vol. 117(22), pp. 11975-11980, 2020.

K. EMANUEL, Evidence that hurricanes are getting stronger, *PNAS*, vol. 117(24), pp. 13194-13195, 2020.

T. KNUTSON *ET AL.*, Tropical cyclones and climate change assessment Part 1 et 2, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100(10), pp. 1987-2007, 2019 et vol. 101(3), E303-322, 2020.

L. ORUBA, *et al.*, Formation of eyes in large scale cyclonic vortices, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 3, pp. 13502-13520, 2018.

L. ORUBA *ET AL.*, Eye formation in rotating convection, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 812, pp. 890-904, 2017.

L. ORUBA *ET AL.*, Rapid oceanic response to tropical cyclone Oli (2010) over the South Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 47(2), pp. 471-483, 2017.

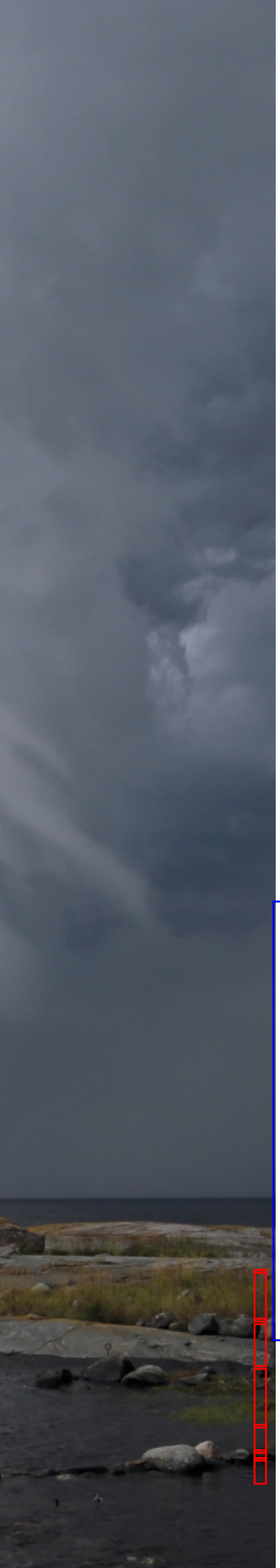
LES AUTEURS

CÉCILE CAILLAUD
est chercheuse à Météo France, au Centre national de recherche météorologiques, à Toulouse.

OLIVIER PAYRASTRE
est chercheur au Laboratoire eau et environnement, à l'université Gustave Eiffel, à Bouguenais, en Loire-Atlantique.

YVES TRAMBLAY
est chercheur au Laboratoire HydroSciences, à l'Institut de recherche pour le développement, à Montpellier.

FREDDY VINET
est professeur de géographie à l'université Paul-Valéry Montpellier 3



© Wikimedia commons / Jukka / (CC BY 2.0)

L'ESSENTIEL

- Le pourtour méditerranéen est régulièrement victime de pluies intenses entraînant souvent l'apparition de crues destructrices, sources de nombreux dégâts humains et matériels.
- Des progrès récents, notamment dans les modèles météorologiques, offrent une meilleure compréhension de ces phénomènes et surtout des conditions favorables à leur apparition.
- Les prévisionnistes sont alors plus en mesure de les anticiper avec précision, tant du point de vue de leur localisation que de la quantité d'eau attendue.
- L'amélioration des prévisions est un enjeu important, car le réchauffement climatique s'accompagne d'une intensification de ces épisodes extrêmes.

Que d'eau, que d'eau !

Les épisodes de pluies extrêmes et les crues qui en découlent sont de mieux en mieux compris. On peut alors mieux les anticiper. Indispensable quand on sait que ces événements vont probablement s'intensifier.

Le vendredi 2 octobre, dans les vallées de la Roya et de la Vésubie, dans l'arrière-pays niçois, jusqu'à 500 millimètres d'eau, soit 500 litres par mètre carré, sont tombés en seulement vingt-quatre heures. Un épisode d'une rare intensité aux conséquences catastrophiques : les crues exceptionnelles qui ont accompagné ce déluge ont tout dévasté sur leur passage, coupant du monde les populations et faisant neuf morts. Comment expliquer un tel phénomène ? Par une conjonction de deux événements, la tempête Alex ayant renforcé un épisode méditerranéen. L'un est inhabituel, l'autre, qui nous occupera ici, plus fréquent. Qu'en sera-t-il à l'avenir ? Qu'attendre de l'effet du réchauffement climatique sur les épisodes de pluies intenses dans le sud de la France ? Comment s'y préparer et limiter au mieux les dégâts (*voir l'encadré page 83*) ? Pour répondre, il convient d'abord de comprendre les rouages de ces manifestations extrêmes où mer et montagne s'associent.

Trois à six fois par an en moyenne et le plus souvent à l'automne, des précipitations intenses touchent le sud-est de la France et déversent l'équivalent de plusieurs mois de pluie en seulement quelques heures ou quelques jours. Tout commence lorsque des conditions météorologiques favorables au développement d'une activité pluvio-orageuse se mettent en place. Le plus souvent, il s'agit d'une zone de basses pressions venant de l'ouest et apportant de l'air froid en altitude qui se combine avec des remontées d'air chaud, humide et instable venant de la mer Méditerranée dans les basses couches de l'atmosphère (*voir la figure page 81*).

On comprend alors que l'automne est la saison privilégiée pour ces événements, quand l'atmosphère commence à se refroidir tandis >

> que la mer est encore chaude, favorisant une forte évaporation. Ce conflit de masses d'air est source d'instabilité, à l'origine de mouvements verticaux intenses : les masses d'air chaud et humide des basses couches s'élèvent et se refroidissent entraînant la condensation de la grande quantité de vapeur d'eau qu'elles contiennent en nuages d'orage, sources possibles de fortes pluies. Les très forts cumuls de précipitations observés lors des épisodes méditerranéens s'expliquent par la quasi-immobilité des systèmes orageux qui se régénèrent pendant plusieurs heures au-dessus de la même région. Une situation due à plusieurs mécanismes de soulèvement de l'air chaud en altitude.

TROIS SOULÈVEMENTS

Le premier est d'ordre orographique, c'est-à-dire lié aux montagnes. Le Massif central, les Pyrénées, les Alpes ou les sommets corses sont autant de barrières sur lesquelles la masse d'air chaud vient buter et s'élever. Les épisodes cévenols, comme celui de novembre 2011 pendant lequel 1 000 millimètres de pluie sont tombés sur l'Ardèche, sont un exemple typique de ce phénomène avec de très forts cumuls de précipitations en quelques jours. Le qualificatif « cévenol », normalement réservé à ce type de soulèvement, est d'ailleurs souvent employé abusivement pour caractériser tout épisode de pluies diluviennes touchant le sud-est de la France.

Le soulèvement résulte aussi parfois de la convergence de vents près de la surface, engendrant des mouvements ascendants stationnaires. Enfin, des bulles d'air froid de surface qui apparaissent essentiellement en raison de l'évaporation des précipitations sous l'orage lui-même ont le même effet. Ces dômes froids agissent comme un relief en soulevant la masse d'air toujours au même endroit. Les orages associés à ce dernier cas se traduisent par de très fortes précipitations, pouvant dépasser les 100 millimètres par heure. Ces deux derniers mécanismes correspondent à des systèmes orageux que l'on rencontre dans des zones de plaine, dès le littoral.

Où en est la prévision des épisodes méditerranéens ? Encore délicate parfois en termes de localisation précise et d'intensité, elle s'est améliorée ces dernières années grâce à une meilleure compréhension des phénomènes et l'évolution des outils numériques de prévision et de suivi de ces épisodes.

Une avancée importante a eu lieu en 2008 avec l'utilisation à Météo France d'un modèle de prévision à très haute résolution, Arome, développé suite aux épisodes méditerranéens dramatiques survenus dans les années 1990, notamment celui qui a entraîné le débordement de l'Ouvèze, à Vaison-la-Romaine, dans le Vaucluse, en 1992. Grâce à la finesse de sa résolution spatiale sur l'hexagone, avec des mailles aujourd'hui de 1,3 kilomètre contre 10 pour son prédécesseur Aladin, Arome est capable de modéliser les mouvements verticaux locaux, et ainsi de mieux simuler les orages.

En pratique, les prévisionnistes peuvent reconnaître une situation atmosphérique favorable à la survenue d'un épisode méditerranéen environ une semaine à l'avance, mais sans pouvoir donner plus de précision à ce stade. Au fil des jours et des sorties de modèles, le scénario se précise. Dans le cas d'un épisode cévenol où le relief, un paramètre stable, joue un rôle prépondérant, la prévisibilité est souvent plus grande. Dans les autres situations, ce n'est qu'à 48 heures d'échéance que la localisation et cumuls attendus se préciseront.

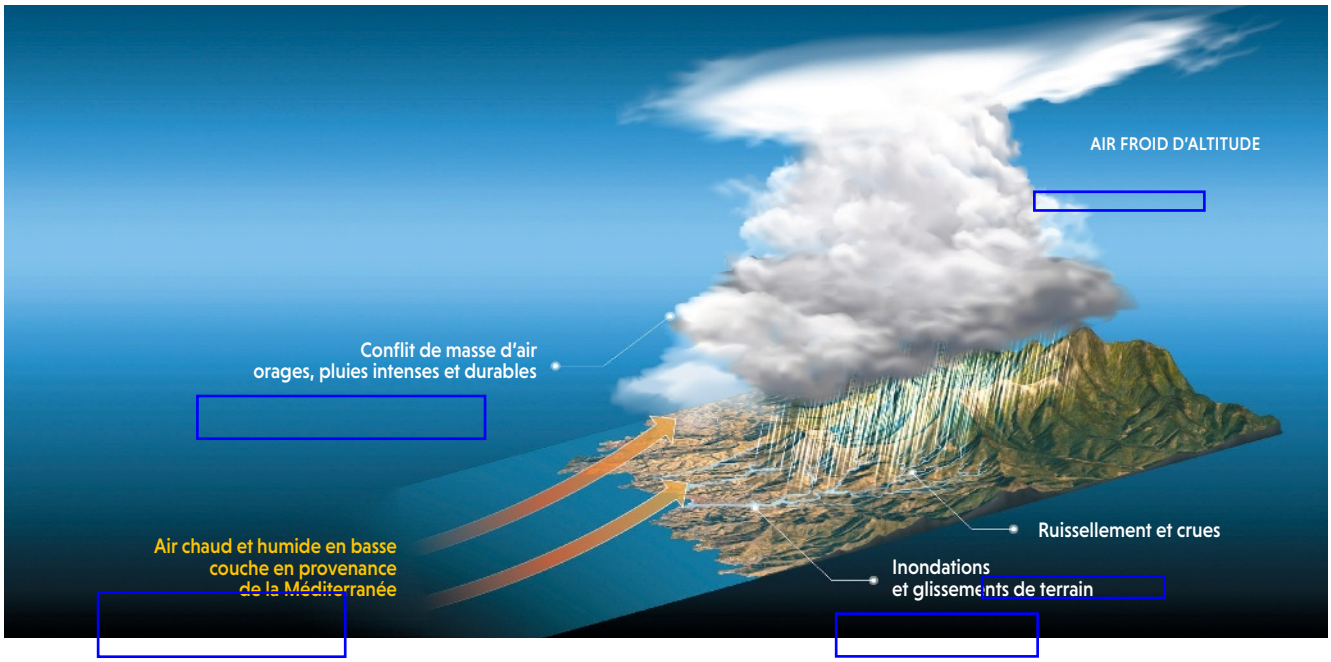
Établie en lien avec le Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi) pour la prévision des crues, la carte de vigilance permet d'avertir la population et les services de la sécurité civile si la situation le nécessite. Enfin, lorsque l'événement se met en place, les prévisionnistes en assurent le suivi en temps réel grâce aux images satellites, aux radars météorologiques et aux cumuls de précipitations mesurés dans les stations au sol afin d'affiner la prévision.

En France, des montées de niveau d'eau de plus de 5 mètres en 1 heure ont parfois été observées

DU CIEL À LA TERRE

De nouveaux progrès sont attendus dans les années à venir grâce à l'amélioration continue des modèles avec notamment une meilleure intégration des observations ainsi que de nouveaux outils. Les prévisionnistes commencent à utiliser une « prévision d'ensemble » avec le modèle Arome : l'idée est d'utiliser plusieurs scénarios de prévision issus de ce modèle pour mieux caractériser la « prévisibilité » des situations plusieurs jours à l'avance et délivrer des informations probabilistes. De la sorte, les populations et les autorités seront mieux informées pour réagir et éviter les drames survenant essentiellement quand les pluies intenses se transforment en crues. De fait, dans quelle mesure peut-on prévoir le comportement des cours d'eau pour alerter et mettre les personnes en sécurité ?

Les réactions des cours d'eau soumis aux pluies intenses méditerranéennes varient notablement dans le temps et l'espace. D'une façon générale, les bassins-versants, c'est-à-dire les surfaces drainées par les cours d'eau, jouent un rôle atténuateur important : ils absorbent une part significative de la pluie, qui s'infiltre et reste provisoirement stockée dans les sols et le



Par le jeu de masses d'air chaudes et froides, des nuages d'orage se forment près des côtes et arroseront l'arrière-pays.

sous-sol, sans contribuer aux écoulements de crue. Les quantités de pluie ainsi captées représentent jusqu'à plusieurs centaines de millimètres lors d'un épisode pluvieux. Mais ces quantités diffèrent fortement selon les bassins-versants, et même selon les événements, car elles dépendent de la couverture et de la nature des sols, ainsi que de l'état d'humidité des sols en début de pluie. Ainsi, certains bassins-versants montrent des comportements à seuil : les crues ne commencent à se former qu'au-delà d'un cumul de pluie très important, pouvant largement dépasser les 100 millimètres. C'est le cas par exemple des bassins karstiques (une structure géomorphologique résultant de l'érosion de toutes les roches solubles, principalement carbonatées et essentiellement des calcaires) qui réagissent souvent tardivement, mais brusquement à la pluie.

Malgré cet effet « tampon » des bassins-versants, les cumuls et intensités pluviométriques très importants observés lors des épisodes pluvieux méditerranéens font que les crues générées sont d'une sévérité rare. Les cellules pluvieuses intenses étant observées sur des surfaces généralement limitées, typiquement de l'ordre de quelques centaines de kilomètres carrés, les crues les plus fortes se forment sur de petits cours d'eau, avec la particularité associée de montées de crues extrêmement rapides, comme ce fut par exemple le cas dans les bassins de la Tinée, la Vésubie et la Roya en octobre 2020 (*voir la figure page 84*).

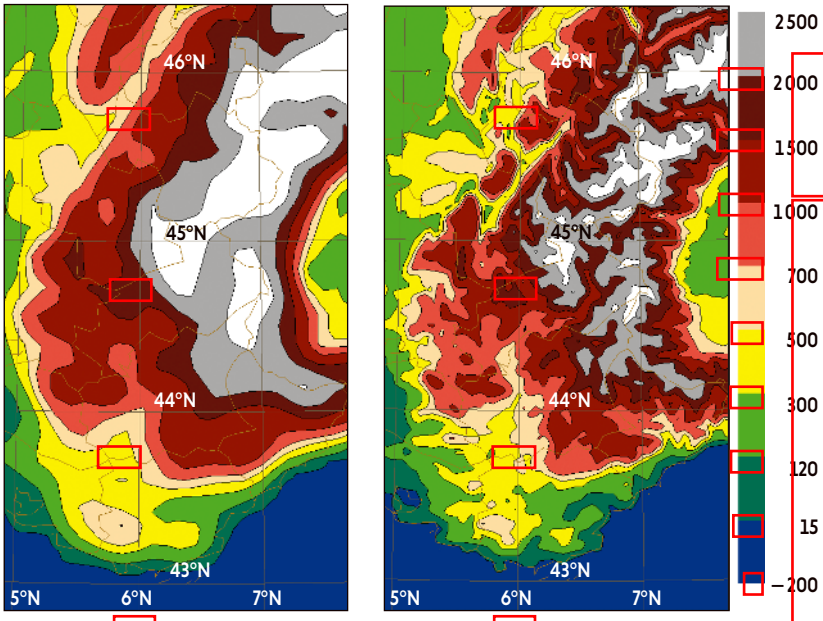
En France, des montées de niveau d'eau de plus de 5 mètres en 1 heure ont parfois été observées. Par ailleurs, les débits spécifiques, c'est-à-dire par unité de surface drainée, des crues observées dans le secteur des Cévennes détiennent des records à l'échelle européenne et méditerranéenne : des crues atteignant des débits spécifiques de 30 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ ont déjà été observées sur de petits bassins de quelques kilomètres carrés de surface drainée. Cette valeur représente l'équivalent d'une intensité pluviométrique de 108 millimètres par heure sur l'intégralité de la surface du bassin-versant.

Lorsque ces crues méditerranéennes, rapides et intenses, se forment, il est souvent trop tard pour s'en protéger efficacement. D'où l'importance de systèmes d'alerte permettant d'anticiper le plus possible la réaction des cours d'eau. Le développement de ces systèmes s'est longtemps heurté à plusieurs difficultés. La première, celle de localiser précisément les pluies intenses, a été résolue progressivement au cours des trente dernières années avec le développement des radars météorologiques. La seconde concerne la modélisation de la réaction hydrologique complexe des petits bassins-versants, une difficulté largement liée au manque d'observations du comportement de ces bassins.

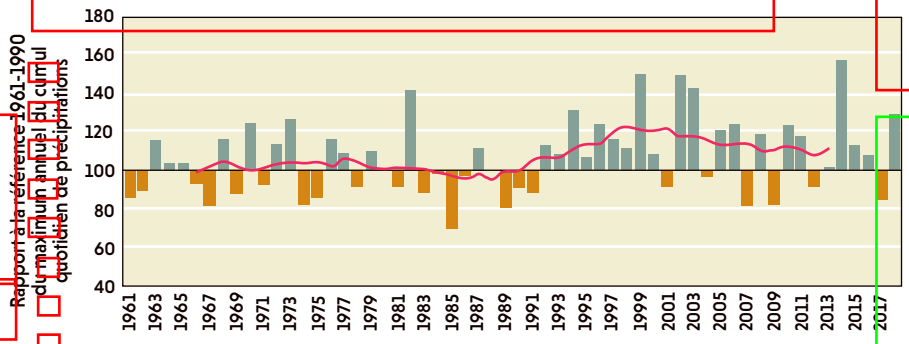
OBSERVER, OBSERVER, TOUJOURS OBSERVER

Durant la dernière décennie, le projet *HyMeX*, lancé par Météo France et le CNRS, a néanmoins beaucoup contribué à documenter et comprendre la formation des crues sur les petits cours d'eau méditerranéens. Avec comme objectif une meilleure compréhension du cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen et une amélioration de la prévision des risques hydrométéorologiques (pluies intenses, crues rapides, vents violents, sécheresses), *HyMeX* repose sur des observations menées dans trois >

© Météo France



Le modèle climatique Arome *(à droite)* prend en compte de façon beaucoup plus précise le relief que son prédécesseur Arpege *(à gauche)*.



Le suivi de l'intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne de 1961 à 2017 montre qu'elle augmente *(en marron, la moyenne glissante sur 11 ans)*.

> «compartiments» (air, mer et terre) et à leurs interfaces, ainsi que sur des études dans le domaine des sciences humaines et sociales. La stratégie a été construite autour de périodes de relevés imbriquées à trois niveaux dans le temps et l'espace.

D'abord, une période d'observations à long terme, de 2010 à 2020, sur tout le bassin méditerranéen afin d'étudier le bilan hydrologique et sa variabilité interannuelle. Dans ce cadre, des retours d'expériences hydrologiques et sociologiques sont organisés après des événements majeurs de crues rapides et inondations. Ensuite, durant des périodes d'observations renforcées, les scientifiques se sont concentrés sur des études de bilan d'eau et de certains processus susceptibles de jouer un rôle important dans la formation de phénomènes hydrométéorologiques extrêmes. Par exemple, une première série d'observations de ce type s'est déroulée tous les automnes de 2012 à 2015 sur les bassins du Gard et de l'Ardèche afin de documenter les crues rapides affectant ces bassins. Enfin, des périodes d'observations spéciales de quelques mois, mobilisant des moyens instrumentaux déployés sur terre, dans les airs et en mer, ont été dédiées à l'étude détaillée des processus clés dans la formation d'événements hydrométéorologiques intenses.

Pendant que *HyMeX* se déployait, un premier système d'avertissement opérationnel dédié aux crues soudaines a vu le jour en France en 2017. Ce système, Vigicrues Flash, couvre actuellement 30 000 kilomètres de petits cours d'eau. Il repose sur la combinaison des observations pluviométriques des radars météorologiques, et d'un modèle hydrologique reliant pluie et débit afin d'anticiper la réaction des cours d'eau. Par ailleurs, des efforts de recherche importants sont toujours en cours pour rendre les modélisations des petits cours d'eau plus précises et détaillées, ceci afin d'améliorer le niveau d'anticipation des crues rapides méditerranéennes. Ces progrès reposent par exemple sur l'utilisation de modèles météorologiques plus performants, comme Arome, avec lesquels on espère prévoir la localisation des pluies violentes à des échéances de quelques heures.

UNE INTENSIFICATION EN COURS

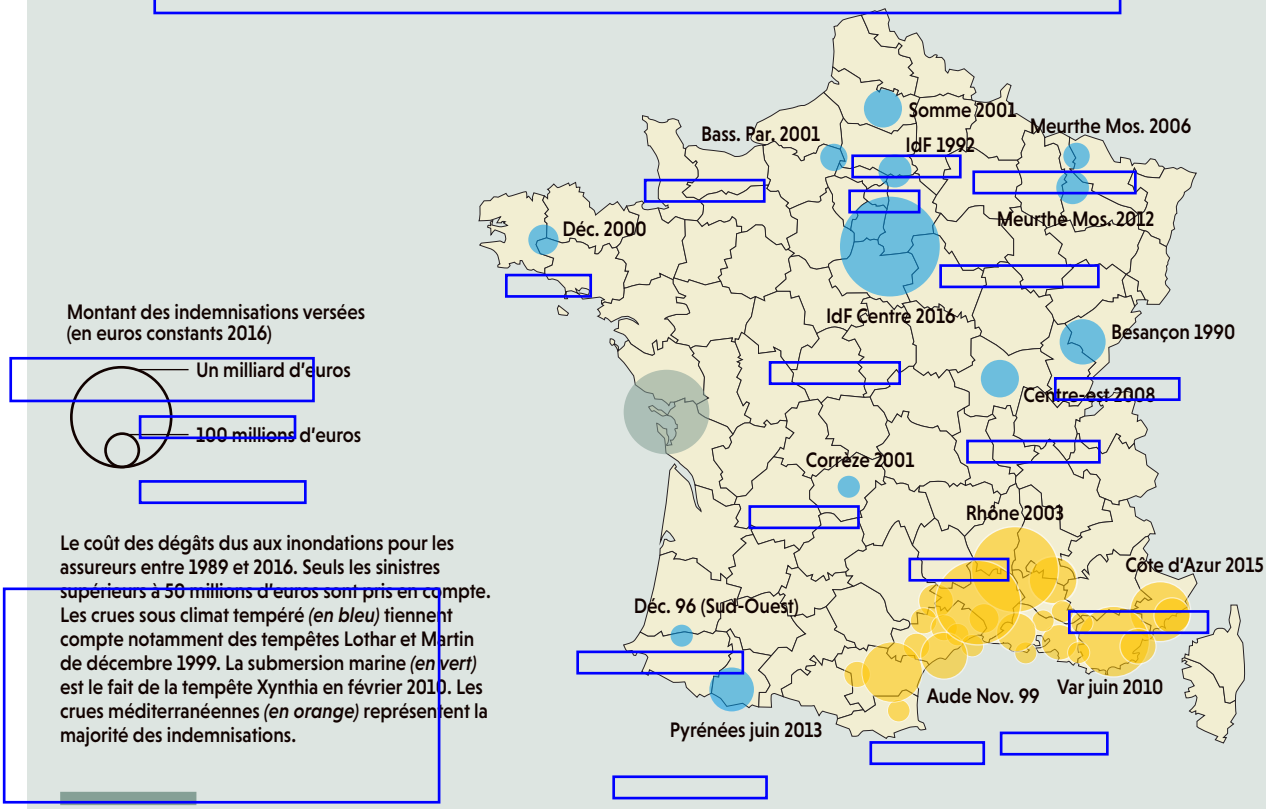
Ces nouveaux outils seront d'autant plus utiles que, à en croire plusieurs travaux, les épisodes de pluies extrêmes dans le sud de la France vont s'intensifier dans l'avenir en raison du réchauffement climatique. En fait, c'est déjà le cas depuis la décennie 1980. Ainsi, il a été estimé qu'entre le début des années 1960 et la fin des années 2010, les pluies extrêmes se sont accrues de près de 22% dans les régions Méditerranéennes françaises.

Ces travaux se basent sur un très grand nombre de données recueillies par les stations météorologiques de Météo France, offrant un suivi de l'évolution du climat sur le long terme. C'est indispensable, car l'analyse des extrêmes nécessite de longues séries de données pour détecter un éventuel changement, étant donné que ces extrêmes, rares par leur nature, ne représentent que quelques jours par an. On attribue aujourd'hui ces changements d'intensité des pluies extrêmes à l'augmentation des températures, celle-ci étant par ailleurs très nettement détectable dans toutes les régions méditerranéennes. La relation de Clausius-Clapeyron stipule que la quantité maximale d'eau sous forme de vapeur dans l'atmosphère augmente avec la température. Plus précisément, le contenu en vapeur d'eau disponible pour des précipitations augmente en moyenne de 7% par degré Celsius. Cette relation se vérifie tant dans les observations météorologiques que dans les modèles numériques utilisés pour la prévision du climat.

Grâce aux modèles, les chercheurs simulent le climat futur en prenant en compte différents >

© www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

PLUIES INTENSES ET CRUES EN MÉDITERRANÉE : QUEL BILAN ?



Le coût des dégâts dus aux inondations pour les assureurs entre 1989 et 2016. Seuls les sinistres supérieurs à 50 millions d'euros sont pris en compte. Les crues sous climat tempéré *(en bleu)* tiennent compte notamment des tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999. La submersion marine *(en vert)* est le fait de la tempête Xynthia en février 2010. Les crues méditerranéennes *(en orange)* représentent la majorité des indemnisations.

Cartographie : F. Vinet source : CCR

Les phénomènes pluviométriques intenses en Méditerranée engendrent des dommages humains et matériels considérables. À l'échelle du bassin, les rives nord et sud de la Méditerranée sont touchées. Si les bilans par événements se sont réduits dans la partie nord, le Sud est marqué par des événements récents particulièrement meurtriers : crues de l'Ourika, au Maroc en 1995, crues de Bab el Oued, en Algérie en 2001… Selon l'International Disaster Database, entre 1950 et 2020, 29 406 personnes seraient décédées lors d'inondations en Afrique dont 8 281 en Afrique du Nord. En France, la carte du coût économique des crues en Méditerranée est sans appel : 66 % des remboursements des assureurs dans le cadre de la garantie « catastrophes naturelles » ont été versés dans les départements du sud-est de la France entre 1989 et 2016, soit 5,8 milliards d'euros (euros constants 2016).

Ces remboursements couvrent les dommages aux logements, aux entreprises et aux automobiles. Il faut doubler la note si l'on prend en compte les dommages agricoles et ceux infligés aux infrastructures : ponts, routes, réseaux d'eau potable, assainissement, réseaux électriques et téléphoniques…

On peut donc estimer à 11 milliards d'euros au minimum le coût des crues méditerranéennes en France en vingt-huit ans, soit près de 400 millions d'euros par an.

Ce bilan s'explique en partie par le pouvoir destructeur des crues. Entre les crues lentes du nord de l'Europe et les crues torrentielles méditerranéennes, les processus et les effets sont radicalement différents. Les processus à l'œuvre lors des crues méditerranéennes ne sont pas seulement hydrologiques, mais aussi géomorphologiques. Par son débit et la vitesse de son courant, le cours d'eau en crue érode, transporte et dépose une charge alluviale et des embâcles, ce qui se traduit par des ruptures d'ouvrage d'art (routes, ponts…), des champs de cultures emportés, des habitations détruites. Ainsi a-t-on pu observer dans les Alpes-Maritimes en octobre 2020, des habitations perchées sur des terrasses alluviales à près de 10 mètres au-dessus du lit mineur s'effondrer suite au sapement de la berge.

Si de tels événements sont rares en un lieu donné, ils ne sont pas exceptionnels. Ils existent de tout temps et font partie du fonctionnement naturel des zones montagneuses méditerranéennes. En revanche l'augmentation constatée des dégâts est intimement liée à l'augmentation des enjeux dans les zones à risque. Depuis une soixantaine d'années, habitations, zones d'activités et réseaux se sont développés en fond de vallée, accompagnant l'augmentation de la population. Autour du bassin méditerranéen, la population des pays riverains est passée de 281 millions en 1970 à 472 millions en 2010. Et les prévisions atteignent 572 millions en 2030, surtout sur la rive sud et en Turquie. Ce doublement de la population s'est accompagné d'un développement des infrastructures touristiques.

Les progrès de la prévention ont du mal à enrayer l'augmentation des dommages. Si l'amélioration de l'habitat et de meilleures prévisions et gestions de crise limitent les impacts humains dans les pays du nord de la Méditerranée, ce n'est pas toujours le cas dans certains pays du sud confrontés à des blocages administratifs et une urbanisation plus anarchique que dans les pays de la rive nord. Pourtant les « gisements préventifs » sont nombreux : la planification urbaine en zone à risque, la réduction des vulnérabilités, l'adaptation du bâti à l'inondation, la généralisation des plans locaux de gestion de crise offrent des perspectives intéressantes de réduction des impacts des crues en Méditerranée. Encore faut-il s'en inspirer.

Les dégâts d'une crue à Breil-sur-Roya.

> scénarios d'émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines. Le Giec en distingue quatre, nommés RCP (pour *representative concentration pathways*) suivi d'un nombre (+ 2,6; + 4,5; + 6; + 8,5) traduisant la modification du bilan radiatif de la Terre par les activités humaines, ce bilan correspondant à la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète.

À l'échelle des bassins-versants méditerranéens, l'augmentation probable des pluies extrêmes est visible et robuste pour le sud de la France, le nord de l'Italie et les côtes Adriatiques, avec un ordre de grandeur des changements projetés qui varie selon les différents modèles de climat et les bassins.

Si l'on peut désormais quantifier l'évolution des cumuls de pluie sur une journée, il est probable que la hausse des températures implique également des changements importants sur les intensités de précipitations horaires liées à des épisodes convectifs orageux. Pour étudier ces phénomènes atmosphériques de petite échelle, de nouveaux modèles climatiques sont en cours de développement. Avec des résolutions spatiales jusqu'alors inédites, ils reproduiront mieux la répartition géographique des précipitations et les extrêmes. Ainsi, dans un avenir proche, des scénarios beaucoup plus précis sur l'évolution possible de ces pluies intenses et de leur localisation seront disponibles.

Concernant les crues, dans le sud de la France, l'augmentation des événements de précipitations extrêmes ne se traduirait pas par une hausse généralisée des épisodes de crues. À l'inverse, à part pour quelques bassins-versants, les simulations révèlent une tendance globale vers une diminution du nombre de crues par an. Pour quelles raisons? La cause serait la diminution de l'humidité des sols, favorisant l'infiltration de l'eau et compensant ainsi l'augmentation des précipitations extrêmes: la transformation d'un épisode de pluie intense en ruissellement de surface puis en crue est freinée. En effet, dans tous les bassins, une augmentation de la température et de l'évapotranspiration a asséché les sols depuis les années 1950.

DES EFFETS CONTRADICTOIRES

Cependant, lorsque le sol est déjà saturé en eau ou lors de cumuls de pluie très importants sur des courtes périodes, la capacité d'infiltration du sol est fortement réduite. Ainsi pour des changements climatiques comparables à l'échelle régionale (en termes de température et de précipitations extrêmes), les tendances sur les crues dans différents bassins-versants varient selon leur topographie, la végétation, la géologie et le type de sol. Des bassins urbanisés, avec des sols en majeure partie imperméables, ou encore des bassins montagneux avec des fortes pentes favorisant le ruissellement, ne vont pas réagir de la même manière à un épisode de pluie intense que des bassins situés en plaine avec une couverture végétale importante ou des terres agricoles.

Face à l'augmentation de l'urbanisation et de la population habitant dans les régions exposées, il est impératif de mieux comprendre la mécanique des épisodes de pluies extrêmes et des crues qui s'ensuivent. Les efforts déployés par les scientifiques vont dans ce sens et s'accentueront. Même s'ils doivent s'accompagner d'indispensables nouvelles pratiques en termes d'urbanisme, ils aideront à mieux anticiper les catastrophes et, qui sait, éviter que les drames de Vaison-la-Romaine ou de Saint-Martin-Vésubie ne se reproduisent. ■

BIBLIOGRAPHIE

Q. FUMIÈRE *ET AL.*, Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model, Climate Dynamics, vol. 55, pp. 77-91, 2020.

A. RIBES *ET AL.*, Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean, *Climate Dynamics*, vol. 52, pp. 1095-1114, 2019.

Y. TRAMBLAY ET S. SOMOT, Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean, *Climatic Change*, vol. 151 (2), pp. 289-302, 2018.

Y. TRAMBLAY *ET AL.*, Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23 (11), pp. 4419-4431, 2019.

***THE MEDITERRANEAN REGION UNDER CLIMATE CHANGE. A SCIENTIFIC UPDATE*, Marseille, IRD Éditions, 2016.**

L'International Disaster Database: www.emdat.be

© Shutterstock.com / Obatala-photography

UN

NE MEURT JAMAIS.

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

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

En ville, la végétalisation des immeubles aide à lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur.

©Shutterstock.com/Marleens

SE RÉCONCILIER AVEC LA NATURE ?

Quand les éléments se déchaînent, comme lors d'incendies ou d'inondations, deux attitudes sont possibles. La première, choisie de longue date, consiste à ériger des barrières de toute sorte afin de tenir à l'écart la menace : ce sont par exemple les digues sur le littoral. La seconde, plus récente, est née des échecs de la précédente. Il s'agit cette fois de se faire de la nature une alliée. Ainsi, quelques feux contrôlés aident à contenir l'ampleur des incendies accidentels. Des édifices naturels, comme les récifs d'huîtres, protègent mieux que des remparts en béton contre la fureur des vagues. Accompagner l'eau et favoriser son écoulement naturel plutôt que de la contraindre dans des tuyaux et des canaux est plus efficace pour éviter la submersion des villes. La leçon est rassurante : nous pouvons limiter les dégâts !

L'ESSENTIEL

- Pour protéger les forêts, on a historiquement cherché à en proscrire toute flamme.
- Ce n'est pas nécessairement la meilleure solution, car lorsqu'un incendie se déclare, il est souvent ravageur.
- En réintroduisant des feux contrôlés, on assainit les forêts et la végétation que l'on rend ainsi plus résilientes aux flammes.
- Ce faisant, on retrouve le fonctionnement normal des écosystèmes où le feu a toujours eu sa place.

L'AUTRICE

JANE BRAXTON LITTLE
est journaliste scientifique.

Combattre le feu par le feu

Comment lutter contre les incendies, souvent gigantesques, qui détruisent chaque année toujours plus de forêts ? Une des solutions, contre-intuitive, consiste à déclencher des incendies préventifs, bien contrôlés.

Septembre 2019, par un matin inhabituellement froid, dans la Sierra Nevada californienne, plus précisément dans la forêt d'Eldorado, à 112 kilomètres de Sacramento. Là, à plus de 2000 mètres d'altitude des hommes brandissent des torches dégoulinant d'essence et enflamment des tas de petites bûches et de branches. Ignorant la neige et la bruine, ils avancent d'un pas lourd et renouvellent l'opération inlassablement. Des pyromanes ? Non, des fonctionnaires du service américain des forêts impliqués dans le Projet de restauration écologique de Caples. Leur objectif : faire du feu un allié plutôt qu'un ennemi dans la lutte contre les incendies géants.

La semaine suivante, les allumeurs de feu progressent vers le bas de la montagne, au nord de Caples Creek. Grâce à des bandes de terre vidées de tout débris forestier, ils ont contrôlé la course des flammes à travers des prairies qui remarquablement n'avaient pas brûlé depuis 1916. Les équipes font particulièrement attention aux pins de Jeffrey *Pinus jeffreyi* et aux pins ponderosa *Pinus ponderosa*, dont certains étaient âgés de 300 ans. Comment ? En les protégeant par l'élimination préventive de tout combustible possible à leur base.

Lorsque les flammes s'éteignent enfin, près de 1400 hectares ont brûlé. Il s'agit de la plus grande opération de feux contrôlés jamais effectuée dans la Sierra Nevada et l'une des plus grandes sur un territoire fédéral dans tout l'État.

FAIRE DE L'ENNEMI UN ALLIÉ

Cet effort s'inscrit dans la volonté, nouvelle, de la Californie de travailler avec le feu, plutôt que de traquer la moindre flamme pour l'éteindre comme elle l'a fait pendant un siècle. L'idée est d'utiliser des feux contrôlés pour restaurer des écosystèmes adaptés à des

Des incendies contrôlés aident à rendre les forêts plus résilientes en y réintroduisant un élément que l'on a sans cesse chassé : le feu.

incendies fréquents et plutôt de petite intensité. De fait, l'approche historique de proscrire tout feu avait conduit les forêts de l'Ouest américain à être anormalement envahies de petits arbres et de buissons propices à l'embrasement et au déclenchement d'incendies bien plus destructeurs. C'est pire encore en Californie, car plus de 147 millions d'arbres morts affaiblis par la sécheresse depuis 2010, sont prêts à s'enflammer à la moindre étincelle. Entre la hausse des températures liée au changement climatique et des pratiques de gestion contestables, Dennis Lettenmaier, de l'université de Californie, à Los Angeles, estime que le nombre d'incendies qui échappent à tout contrôle même drastique a quintuplé ces cinquante dernières années. Pour preuve de cette aggravation, les incendies de 2020, que ce soit dans les montagnes au nord de Los Angeles ou à l'ouest de Sacramento, ont déjà brûlé 30% de terrain de plus qu'en 2019. Les pompiers ont été dispersés sur plusieurs fronts, réduisant l'efficacité de leur action, tandis que le gouverneur Gavin Newsom déclarait l'état d'urgence. Et la tendance ne semble pas près de s'inverser, à moins que…

Dès 2011, les gardes forestiers d'Eldorado avaient identifié les flancs escarpés et émaillés de granit de Caples Creek comme une région prioritaire pour une restauration écologique. Le projet lui-même est sur les rails depuis cinq ans, à la merci d'un éclair intempestif ou d'un campeur imprudent. C'est le temps qu'il a fallu pour définir avec soin la stratégie à mettre en œuvre. « Il s'agit de réintroduire le feu dans le paysage : restaurer ce processus vital et naturel des écosystèmes, afin de ralentir à terme la propagation des feux indésirables, souvent de plus grande ampleur et incontrôlables », explique Jeff Marsolais, responsable de la forêt d'Eldorado.

Financé à hauteur de 477000 dollars, le plan développé par les scientifiques prévoit de brûler plus de 3500 hectares sur quinze ans afin de réduire la couverture végétale basse et inflammable et de restaurer les prairies qui parsèment les forêts de pins et de sapins.

GÉRER L'IMPRÉVU

Outre la prévention des feux gigantesques et incontrôlables, ce procédé vise à rétablir des forêts suffisamment saines pour permettre aux petits incendies de brûler sans entrave. À Caples Creek, les parcelles brûlées ont été définies de façon à favoriser diverses espèces selon une mosaïque associant grandes ouvertures et couverts arborés où le feu peut occasionnellement consumer les sous-bois sans endommager les grands arbres. « Nous voulions réintroduire le feu où il est bénéfique tout en occasionnant le moins de dégâts possible », raconte l'écologue Becky Estes, à l'origine du plan suivi à Caples Creek.

Mais le projet ne s'est pas entièrement déroulé comme prévu. Des vents forts et inattendus se sont levés dix jours après les premiers feux, en poussant certains hors de la zone définie (de 430 hectares), vers des forêts >

© National Wildfire Coordinating Group NWCG.gov

non préparées. Les pompiers appelés en renfort sont venus à bout des flammes fugitives après qu'elles eurent brûlé 950 hectares.

Selon Tony Scardina, chef adjoint des forêts nationales en Californie, de tels imprévus font partie du processus d'apprentissage pour réintroduire le feu dans la Sierra Nevada après cent ans pendant lesquels tout a été fait pour l'en chasser. « Il y a toujours des risques, qu'il s'agisse d'un incendie contrôlé ou non », concède-t-il, mais il reste ferme : « notre engagement reste le même ; nous porterons ces écosystèmes vers un état de résilience. Et nous tirerons les leçons des accidents pour améliorer continuellement notre programme. »

Avant d'inspecter en sécurité la zone brûlée, Tony Scardina et ses collègues ont dû attendre la fonte des neiges hivernales, ainsi que la mise en place par les autorités de protocoles sanitaires contre le Covid-19. Neuf mois après l'incendie, la piste qui longe Caples Creek grimpe à travers des lupins violets fleurissant parmi les souches carbonisées. Des troncs d'arbres noircis ponctuent les tapis d'herbe épaisse, tandis que le soleil filtre à travers la canopée des conifères, dont la moitié verte contraste avec l'autre, roussie par le feu. Helen Payne, botaniste, est à quatre pattes, à quelques pas de la piste, examinant un cèdre marqué de brûlures noires. Derrière elle, des pins abattus par le feu et les bûcherons s'appuient contre des arbres toujours debout, bien qu'affaiblis par l'incendie, jusqu'à la prochaine tempête. Le sol est jonché d'épines sèches émaillant les cendres des feux de l'an passé.

LA NATURE REPREND SES DROITS

Helen Payne inventorie dans une zone de quelques dizaines de mètres carrés de surface : jeunes plants, plantes à fleurs, champignons, arbres… Pour ces derniers, elle note leur état (bonne santé, partiellement brûlés ou abattus par le feu). Cette parcelle est l'une des 105 que Becky Estes a définies avant l'incendie contrôlé pour surveiller ses effets sur la végétation. L'opération sera renouvelée tous les cinq ans. Helen Payne pointe un minuscule arbre au tronc à peine aussi épais qu'un fil, mais soutenant les frondes fragiles d'une nouvelle vie. « Nous en avons trouvé deux », s'enthousiasme-t-elle, manifestement rassurée par la vitesse de régénération.

Les données collectées sur 46 parcelles au mois de novembre, deux mois après les incendies contrôlés, renseignent sur les effets immédiats de l'incendie. Malgré un feu intense en certains endroits et les quelque 1 000 hectares supplémentaires ayant pris feu, les forêts sont généralement devenues plus saines, estime l'écologue Scott Dailey. Avant le brûlage, la densité de jeunes arbres de 20 centimètres de diamètre était trois fois supérieure à celle préconisée par les scientifiques pour une forêt résiliente. Ces petits arbres s'embrasent facilement, fournissant aux flammes une échelle vers les sommets des plus grands. L'incendie qui s'est échappé a en fait complété le travail du feu contrôlé pour atteindre cette densité seuil recommandée, explique Scott Dailey.

Les flammes maîtrisées ont par ailleurs efficacement réduit l'épaisseur de la litière forestière sous les arbres (là où les feux sauvages démarrent le plus souvent) de 5 à moins de 1,30 centimètre. Le feu non contrôlé a été encore plus efficace, la litière n'atteignant plus que 0,7 centimètre après son passage. Dans l'ensemble, la combinaison des feux contrôlés ou non a produit des forêts bien plus proches des conditions naturelles, estime Scott Dailey. Toutefois, des dégâts sont à déplorer : les bulldozers recrutés pour contrôler les flammes qui se sont échappées ont laissé des cicatrices sur le sol forestier. Et des arbres ont été éparpillés n'importe comment, car les pompiers ont dû les abattre pour contenir le brasier.

L'une des leçons du projet Caples est le rôle crucial de la météorologie, remarque Jeff Marsolais, personne n'ayant prédit que les vents pousseraient les flammes au-delà de la zone prévue. « Nos capacités de prévision sont limitées. Nous nous concentrons désormais sur leur fiabilité, » dit-il. L'opération a aussi révélé que de nombreuses forêts de la Sierra Nevada sont simplement trop peuplées pour que le feu

Soit nous travaillons avec le feu, soit il nous dicte sa loi

Neuf mois après que cette prairie a brûlé, des lupins violets et les renouées blanches ont reconquis le terrain.

© Jane Braxton Little

Le feu, absent de cette pinède depuis plus d'un siècle, a rajeuni la végétation, qui s'épanouit désormais grâce aux nutriments apportés par les cendres.

© Jane Braxton Little

y soit réintroduit sans une étape importante de préparation comme celle déployée à Caples. « Vous ne pouvez pas juste remettre le feu dans le paysage, » insiste Jeff Marsolais.

UN PETIT PAS POUR LA FORÊT

L'incendie contrôlé de Caples est un premier pas important, mais la route est encore longue vers la restauration de la capacité de résilience des forêts, explique Malcolm North, du service des forêts des États-Unis. Pour restaurer l'état original des forêts (où elles survivent et bénéficient des feux naturels), il estime qu'il faudrait brûler plus de 200000 hectares par an sur les 2 millions que le service des forêts gère dans la Sierra Nevada. L'objectif en 2020 est de restaurer 93000 hectares, dont seuls 24000 seront brûlés. Pour le reste, tronçonneuses et autres outils mécaniques seront utilisés pour affiner les arbres. « Quoi que nous puissions faire pour changer le rythme et l'ampleur des brûlages dirigés, ils resteront notre priorité à 99,9 % », précise Malcolm North.

La résilience des forêts est importante pour la plupart des populations vivant autour. Les répercussions de la mauvaise santé des forêts, propices à l'embrasement, se sont multipliées, en particulier après les feux dévastateurs de 2018. Le prix des assurances a doublé voire triplé pour les propriétaires terriens. Trop de personnes ont été surprises par l'arrivée d'un incendie, obligeant à des évacuations de dernière minute, sans compter les dizaines de victimes. Cependant, les conséquences les plus envahissantes sont les fumées qui étouffent aussi bien villes et villages que zones rurales, augmentant les risques d'asthme et d'autres problèmes respiratoires.

L'acceptation de la fumée par la population est justement l'un des plus grands défis qu'affrontent les projets de ramener les feux naturels dans les forêts de la Sierra Nevada. De fait, les incendies dirigés émettent bien de la fumée. Cependant, note Jeff Marsolais, celle des incendies sauvages transporte bien plus de composés toxiques issus de la combustion des maisons et des véhicules. Craig Thomas, ancien directeur exécutif de l'ONG Sierra Forest Legacy considère la fumée comme un compromis. Avec des responsables des ressources aériennes, il a engagé une collaboration multipartite pour améliorer la coordination entre la gestion du feu et la santé publique. Les forêts de la Sierra Nevada californienne ont de toute façon une propension naturelle à s'embraser, que ce soit lors de feux sauvages ou d'incendies contrôlés, donc « soit nous travaillons avec le feu, soit il nous dicte sa loi », résume Craig Thomas.

Les responsables de la forêt d'Eldorado continuent d'étudier les effets des incendies contrôlés de Caples en même temps qu'ils se préparent pour la prochaine campagne, probablement dans une zone adjacente en 2021. La restauration de la santé des forêts et des écosystèmes à une échelle significative est un processus à long terme, explique Jeff Marsolais. « Nous ne pouvons pas lâcher prise, ajoute-t-il, car les feux sauvages n'attendent que ça. » ■

BIBLIOGRAPHIE

Le projet de restauration écologique de Caples: https://bit.ly/3pH6GnU

P. WILLIAMS *ET AL.*, Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California, *Earth's Future*, vol. 7(8), pp. 892-910, 2019.

La nature plus forte que le béton

Contre les tempêtes, des aménagements naturels, comme les marais ou les récifs huîtriers, protègent mieux les littoraux que les structures artificielles. Il serait temps que l'on en prenne conscience.

Le 27 août 2011, l'ouragan Irène dévastait la Caroline du Nord et ravageait les Outer Banks, un long chapelet d'îles sableuses qui s'étire sur plus de 300 kilomètres entre l'océan Atlantique et le continent. La tempête, accompagnée d'extraordinaires précipitations, a projeté sur cette fragile barrière des vagues de trois mètres de hauteur, détruisant des routes et plus de 1000 foyers. Peut-on empêcher que cela se reproduise ?

Pour le savoir, Rachel Gittman, de l'université de Caroline du Nord, à Chapel Hill, a décidé d'étudier les zones endommagées. Elle avait auparavant travaillé pour la marine américaine sur un projet de stabilisation du littoral et avait été surprise du peu d'informations disponibles sur la résilience des côtes. Elle a donc décidé de creuser le sujet.

Ses travaux ont montré qu'outre les littoraux gravement touchés, trois quarts des digues étaient altérées. Ces murs, généralement en béton et hauts de deux mètres, sont le moyen de défense standard contre les aléas de la mer qu'emploient les propriétaires de maisons en bien des endroits. À l'inverse, pas un seul des marécages côtiers naturels n'avait souffert de la tempête. Ces marais, qui s'étendent sur dix à quarante mètres depuis le rivage, n'avaient perdu aucun sédiment ni subi d'altération à cause d'Irène. Les bourrasques avaient certes réduit la densité de la végétation de plus d'un tiers, mais une année plus tard, celle-ci avait repris du poil de la bête et était, en de nombreux endroits, plus dense que jamais.

Ainsi, les littoraux « blindés », comme ceux équipés de digues, offrent une protection moins efficace contre les grosses tempêtes qu'on ne l'imagine. En réfléchissant l'énergie des vagues au lieu de la disperser, ces ouvrages tendent à s'user à leur base et s'inclinent progressivement vers la mer. Suffisantes contre les tempêtes classiques, les digues sont souvent inutiles lorsque de hautes vagues les surpassent, ce qui cause leur rupture ou leur effondrement.

Dans une étude plus récente, Rachel Gittman, avec d'autres chercheurs, a interrogé 689 propriétaires de locaux situés sur le littoral. Le constat est implacable. Les bâtiments protégés par des digues, soit 37 % des constructions, ont subi à eux seuls 93 % des dégâts recensés. Pourtant, les digues nécessitent des dépenses d'entretien quatre fois supérieures à celles requises par les protections naturelles.

De plus en plus de scientifiques et de décideurs politiques se rendent compte que les « littoraux vivants », c'est-à-dire les écosystèmes naturels de marais salants, de mangroves, de récifs huîtriers ou coralliens, de plages… sont d'une étonnante efficacité contre les assauts de l'océan. Et ces derniers sont redoutables ! Les côtes se désintègrent sous l'effet conjugué de l'élévation du niveau des mers et des tempêtes toujours plus fortes. Chaque jour, les vagues grignotent 89 hectares des États-Unis et engloutissent l'équivalent de 500 millions de dollars de constructions. En tout, 40 % du littoral

© Toutes les photographies sont de John Althouse

L'ESSENTIEL

- En de nombreux endroits, les marais et autres écosystèmes protègent les littoraux plus efficacement que les murs et sont moins chers à installer.
- Les scientifiques cherchent à reconstruire des barrières naturelles endommagées et personnalisent les solutions pour chaque littoral.
- Par exemple, les récifs d'huîtres sont privilégiés là où ces mollusques sont abondants.
- Les gouvernements et les experts accordent de plus en plus d'attention aux littoraux vivants, et de crédits pour les restaurer.

L'AUTEUR

ROWAN JACOBSEN
est journaliste et écrivain, spécialiste de l'environnement et de sa sauvegarde.

Des récifs d'huîtres, des alliés pour restaurer et protéger le littoral.

> états-unien souffre actuellement de l'érosion, et en certains endroits, notamment à Shackleford Banks, dans les Outer Banks, le phénomène est saisissant : l'île fond comme neige au soleil. En France, 27,7 kilomètres carrés ont été perdus ces cinquante dernières années, conquis par la mer.

LE VERT CONTRE LE GRIS

À l'époque où Irène abordait la côte est des États-Unis, de l'autre côté du pays, Michael Beck, de l'université de Californie, à Santa Cruz, commençait une collaboration avec les professionnels de l'assurance à même de bouleverser la conservation du littoral. Avec des protections naturelles, les mécanismes en jeu sont connus, ils relèvent de la physique des fluides. Par exemple, les récifs de corail et d'huîtres limitent l'érosion et les inondations en agissant comme des brise-lames naturels, dispersant l'énergie des vagues avec leurs surfaces tarabiscotées. Quant aux marais salants et aux mangroves, entre leur étendue et les forêts de tiges créatrices de friction, une bande de moins de 15 mètres de largeur pourrait absorber plus de 50% de l'énergie des vagues.

Toutefois, personne n'avait rendu cette physique utilisable par les décideurs. Michael Beck a souhaité rectifier cela. « Si je veux changer les pratiques, explique-t-il, je dois regarder les modèles utilisés dans la gestion des risques et y intégrer les écosystèmes. » Avec ses collègues, il a collaboré avec la Lloyd's de Londres, Swiss Re et d'autres acteurs majeurs de l'assurance, qui disposent des meilleurs données et modèles de prévision des risques. Lorsque ces modèles ont été modifiés pour intégrer les écosystèmes côtiers dans les simulations, il est devenu évident que les littoraux vivants constituaient d'excellentes défenses. De plus, remarque Michael Beck, « l'Agence américaine de gestion des urgences, le Corps des ingénieurs de l'armée ou les banques de développement sont beaucoup plus réceptifs quand je leur dis que mes données ont été obtenues avec des spécialistes de l'assurance… ».

La première étude de ce genre se concentrait sur les dégâts causés par l'ouragan Sandy, qui a ravagé les États de New York et du New Jersey en 2012. Travaillant avec le cabinet Risk Management Solutions, spécialiste de l'évaluation des risques, les scientifiques ont montré que les marécages ont permis d'économiser 625 millions de dollars de dégâts, un résultat d'autant plus remarquable que les côtes de la région concernée avaient déjà perdu 60 à 90% de leurs zones humides protectrices. Dans les surfaces inondées, les quelques marais restants ont réduit les dégâts des inondations de 11% en moyenne. La capacité de se protéger des inondations ordinaires était tout aussi importante : selon une étude locale, les dégâts subis par les propriétés situées derrière des marécages ont été inférieurs de 16% à ceux des résidences ne bénéficiant plus de cette barrière.

Avec ses partenaires, Michael Beck a ensuite appliqué ses modèles à la côte du Golfe, soit la partie américaine du golfe du Mexique, entre le Texas et la Floride, une région régulièrement malmenée par de grosses tempêtes. Ils ont conduit une analyse exhaustive sur les coûts et bénéfices annuels attendus pour tous les types d'infrastructure. La zone subirait 134 milliards de dollars de dommages sur vingt ans si aucune mesure préventive n'était prise. L'élévation des maisons réduirait certes les pertes de 39,4 milliards de dollars, mais cette solution coûterait… 54 milliards de dollars. Les digues de six mètres de haut actuellement en construction en Louisiane sont une option pire encore : elles n'entraîneraient qu'un dollar d'économie pour quatre dépensés. De plus petits remparts, construits sur terre devant de nombreuses communautés littorales basses ont évité beaucoup plus de dommages pour quasiment le même prix.

Les sacs de sable seraient le meilleur investissement avec une économie de 8,4 milliards de dollars pour une dépense d'à peine 840 millions. Les défenses naturelles sont tout aussi

intéressantes. La restauration des marécages, qui empêcheraient 18,2 milliards de dollars de pertes, ne coûterait que 2 milliards. La reconstitution des récifs huîtriers éviterait 9,7 milliards de dollars de pertes pour 1,3 milliard dépensé. Le retour d'îles barrières sauverait 5,9 milliards de dollars pour un investissement de 1,2 milliard. Et le renflouement des plages appauvries avec du sable prélevé dans les fonds marins, dans l'est du Golfe, économiserait 9,3 milliards de dollars pour un coût de 5,5 milliards. La performance de cette dernière option, qui s'apparente à vouloir remplir un seau percé, a beaucoup surpris. En résumé, sur les 134 milliards de pertes annoncées, on peut en éviter plus de 50 (soit environ 40%) de manière rentable grâce à des infrastructures vertes.

Une autre forme de restauration ne faisait pas partie de l'étude: laisser fuiter des eaux chargées en sédiments du Mississippi par un trou dans les digues du fleuve pour que ces sédiments se répandent dans les marécages en difficulté améliorerait leur santé. Mais la région s'affaisse, notamment en raison des milliers de kilomètres d'oléoducs qui parcourent le delta dans des canaux creusés, fragilisant le bassin sédimentaire. Même le très boueux Mississippi ne peut pas seul la sauver de l'avancée de la mer.

Michael Beck remarque que les infrastructures construites sont encore très importantes et que la rentabilité n'est pas la seule considération. «Partout où vous trouverez une quantité significative de propriétés et d'habitants, [les solutions naturelles] seront employées conjointement à des infrastructures artificielles,» précise-t-il. Les zones métropolitaines, les ports et autres zones où la tolérance face au risque d'une inondation majeure est extrêmement faible recourent à des digues hors normes, même si elles ne sont pas rentables. Cependant, une approche hybride serait ici profitable, car «si vous construisez des digues, elles ont besoin d'être moins hautes quand des marécages les précèdent».

Une des raisons pour lesquelles les littoraux vivants deviennent une option économiquement viable pour la protection côtière est que l'on sait de mieux en mieux les reconstruire. Les premières tentatives de restauration des marécages, fondées sur l'idée que chaque plante doit avoir suffisamment d'espace pour éviter la compétition, étaient en fait contre-productives. En effet, «ensemble, les plantes marécageuses partagent l'oxygène de sorte que leur taux de croissance est deux fois plus élevé», explique Brian Silliman, de l'université Duke, en Caroline du Nord. Plantez-les en grosses touffes, et le taux de croissance de chaque plante peut même tripler. Ajoutez des crabes bleus, friands d'escargots herbivores, et la végétation s'épanouira plus encore.

Les scientifiques ont aussi découvert que les marécages se portent mieux quand ils sont eux-mêmes protégés par une bande robuste constituée de matériaux durs comme des coquilles, des pierres... et faisant face à la mer. La hauteur et la position de cet édifice sont ajustées de façon que l'eau le recouvre seulement à marée haute. Cette «marche», ou berme, dissipe une grande partie de l'énergie des vagues et retient les sédiments grâce auxquels l'herbe s'épanouit et les sols marécageux sont préservés, voire renforcés.

Peu importe le matériau tant qu'il est solide. De grands projets de stabilisation des côtes utilisent d'énormes rochers ou des blocs de béton empilables, une pratique critiquée par certains experts pour qui ces littoraux n'ont de vivants que le nom. Cependant, de nombreuses approches de restauration de plus petite envergure intègrent des édifices naturels. Ainsi, dans le sud-est des États-Unis et sur la côte du Golfe, les marécages disposaient historiquement d'une berme naturelle sous la forme de récifs d'huîtres intertidaux. Mais une grande partie de ces derniers, victimes d'une surexploitation, n'assure plus son rôle protecteur, exposant les marais à l'érosion. Comment y remédier?

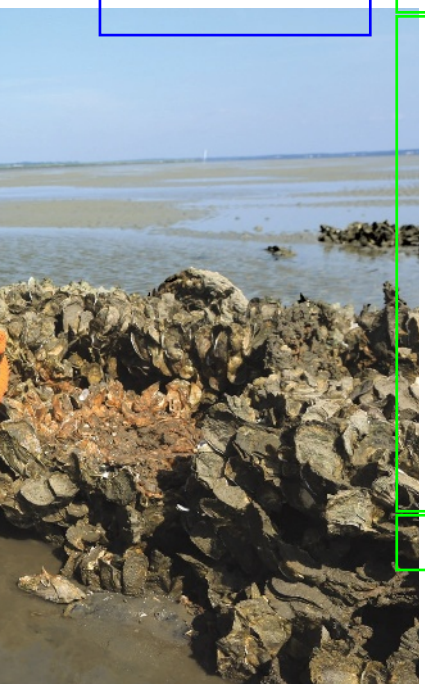
Dans ces eaux chaudes et propices à l'épanouissement des huîtres, on restaure ces récifs en installant un substrat solide, à l'avant des marais, pour que les jeunes huîtres puissent s'y fixer. Dans certains sites battus par les vagues, on installe des petites structures creuses en béton ou des filets en plastique remplis de coquillages. Lorsqu'ils fonctionnent, ces matériaux artificiels sont rapidement recouverts d'huîtres et disparaissent sous le récif croissant. Mais le béton demeure souvent visible pendant des années, et les sacs sont critiquables car ils se corrompent et dégradent l'environnement.

L'ATTRAPEUR D'HUÎTRES

Rachel Gittman teste l'*Oyster Catcher* («attrapeur d'huître»), un matériau alternatif constitué de toile de jute trempée dans du ciment et roulée selon diverses configurations. Sa surface, quand elle s'est solidifiée, offre un espace suffisant pour recruter des larves d'huîtres. Léger et flexible, il résiste en outre assez longtemps pour qu'un récif s'établisse avant de se désintégrer. Ce produit a connu son baptême du feu lorsque les ouragans Florence et Michael ont frappé la Caroline du Nord en 2018. Les sacs de coquillages ont valdingué dans les marécages, mais les récifs d'*Oyster Catcher* n'ont pas bougé.

Rachel Gittman et Michael Beck soulignent le besoin d'adapter les littoraux vivants aux conditions locales. Si la restauration des récifs d'huîtres est si efficace dans le Golfe et le Sud-Est, c'est qu'il y a une grande quantité d'huîtres sauvages. Ce n'est pas le cas partout.

La leçon vaut aussi pour les récifs coralliens, la défense naturelle la plus sous-estimée. «Il s'agit de l'écosystème le plus efficace pour >



L'Oyster Catcher («attrapeur d'huîtres») est une toile de jute enduite de ciment sur laquelle les huîtres, jeunes et adultes, s'épanouissent. Les remparts ainsi édifiés protègent les marais et, au-delà, la terre ferme, des assauts de l'océan.

LE LITTORAL FRANÇAIS, AUSSI ENTRE BÉTON ET NATURE

La France n'est pas épargnée par les tempêtes. Des cyclones et des ouragans marquants ont frappé les côtes ces dernières années (Lothar et Martin en 1999, Dean en 2007, Klaus en 2009, Xynthia en 2010, Irma en 2017…), causant des submersions ou des modifications importantes du trait de côte.

Cette succession d'événements est survenue dans un contexte de réflexions et de travaux entamés depuis la fin des années 2000 à la suite de divers « Grenelle » et de la prise en compte des effets prévisibles du changement climatique. Les autorités n'ont en grande partie analysé les conséquences des phénomènes cités que par le prisme de leur caractère exceptionnel et du dimensionnement et de la défaillance des systèmes de défense existant. Cependant, l'aménagement du territoire et le rôle des éléments naturels participant à la résilience des territoires ont de plus en plus leur place dans la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) de l'État et les Programmes d'actions et de prévention des inondations (PAPI) des collectivités.

L'efficacité des milieux naturels dans la réduction des aléas lors des événements extrêmes s'est de fait imposée. Ainsi, lors de la tempête Xynthia, les débordements massifs de l'onde de marée dans les marais et plaines littorales dans l'aval de l'estuaire de la Charente ont diminué localement la hauteur d'eau dans la ville Rochefort et limité la submersion.

Pour faire face, la France étudie et expérimente des solutions fondées sur la nature. Citons les marais maritimes naturels, les prés salés et les mangroves qui amortissent la houle. Ou encore, les dunes libres formant une sorte de digue naturelle et les récifs d'huitres, de posidonies, de coraux ou d'hermelles (des vers marins bioconstructeurs) qui jouent le rôle de brise-lames. En plus de leur rôle dans le maintien du bon état écologique des territoires, toutes ont l'avantage de se régénérer naturellement et gratuitement après un événement majeur. Mais pas immédiatement.

L'approche française se distingue toutefois en ce qu'elle est, pour l'instant, plutôt portée par des acteurs de la protection de l'environnement et donc plutôt axée sur des méthodes de restauration ou de confortement des milieux côtiers en accompagnant les phénomènes naturels. Les pays anglo-saxons mettent l'accent sur la notion de risque, et dans ce cadre, privilégient plus l'ingénierie verte en créant de nouveaux substrats et milieux.

Le Conservatoire du littoral, à travers le programme *Life Adapto*, expérimente divers types de solutions fondées sur la nature sur dix littoraux, des côtes poldérisées (en grande partie en dessous du niveau de la mer) du Pas-de-Calais jusqu'à la Corse en passant par l'Atlantique et même la Guyane. Neuf autres territoires se sont aussi engagés dans cette dynamique *via* un appel à projets lancé par le ministère de la Transition écologique en 2019.

Ces initiatives aideront à mieux comprendre les conditions de l'efficacité de ces solutions, tant sur les points techniques que réglementaires et sociaux dans le contexte français, assez spécifique. En effet, dans notre pays, les collectivités sont tenues d'assurer un niveau de protection défini qu'il est difficile de garantir avec des solutions sans digues. Autre particularité française, l'importance donnée à la puissance publique pour la protection contre les inondations et la gestion de l'érosion rend plus compliquée l'acceptation des riverains et des usagers (alors que dans les pays anglo-saxons, les propriétaires sont partie prenante des décisions et du financement) de solutions certes plus économiques, mais qui impliquent de rendre des espaces, parfois très utilisés, à la mer, et de potentiellement changer des pratiques, notamment de loisirs.

L'acceptation sociale de cette mobilité et des nouveaux paysages créés, leur retranscription politique et réglementaire, ainsi que l'accompagnement des activités économiques et des zones protégées du littoral vers l'intérieur des côtes constituent actuellement le défi majeur dans notre pays pour la mise en place de solutions fondées sur la nature. Pourtant, celles-ci restent parmi les plus appropriées pour préparer les territoires littoraux aux effets déjà perceptibles du changement climatique.

ADRIEN PRIVAT,
responsable de mission interface terre-mer au conservatoire du littoral.

Le marais de Moëze, en Charente-Maritime, est une succession de marais salants obtenus par creusement et endiguement. Il est aujourd'hui fragilisé par les aléas climatiques récurrents, mais plusieurs scénarios de gestion du trait de côte sont à l'étude pour le préserver.

© Geos-AEL / Conservatoire du littoral-2018

> réduire le risque d'inondation », rappelle Michael Beck. Quand ils sont en bonne santé, les coraux édifient des brise-lames remarquablement efficaces, réduisant jusqu'à 97 % de l'énergie des vagues. Ils sont aussi abordables : la restauration des récifs coûte en moyenne environ 1 300 dollars par mètre contre 20 000 pour des brise-lames artificiels.

Bien sûr, de nombreux récifs coralliens sont mal en point, et la perte d'un seul mètre de hauteur de récif double les dégâts directs liés aux inondations. Pour cette seule raison, Michael Beck parie sur cette démarche : la science de la restauration des récifs coralliens est jeune, mais le potentiel est énorme, tant qu'un récif ne s'est pas effondré. « Certains de ces coraux croissent en fait assez vite, précise Michael Beck, par exemple en Indonésie. »

La réhabilitation des zones côtières recevra-t-elle un jour l'attention qu'elle mérite ? La situation semble évoluer dans ce sens. Ainsi, le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis, qui pendant des années a favorisé des solutions impliquant des matériaux solides comme le béton, a lancé un projet d'« Ingénierie avec la nature ». L'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (la NOAA) a de son côté fait des littoraux vivants la pièce maîtresse de son plan de résilience côtière. Des centaines de projets ont abouti ou sont en cours, allant de la stabilisation des rivages dans le Maryland au retrait des digues artificielles dans le détroit de Puget, en face de Seattle. La plupart sont à l'initiative de petites communautés, mais des entreprises de plus grande ampleur sont de plus en plus communes.

SAN FRANCISCO SE LÈVE

Les financements sont désormais au rendez-vous. Des kilomètres de récifs huîtriers en devenir bordent maintenant l'Alabama, le Texas et la Louisiane. Le projet phare est l'Isle aux Herbes, au large de l'Alabama, où le littoral avait reculé jusqu'à 100 mètres. Nature Conservancy, une organisation de protection de l'environnement, a aligné trois kilomètres de sacs de coquillages et de boules de béton à environ 30 mètres au large. À peine installé, le récif a bloqué l'énergie des vagues, permettant aux marais de se reconstruire. En deux ans, environ 200 jeunes huîtres par mètre carré avaient colonisé la structure, la recouvrant et attirant des poissons, des crabes et des oiseaux.

Ailleurs, les projets de restauration peuvent être plus difficiles à mener. En Californie, par exemple, l'entreprise est ardue. « Dans la baie de San Francisco, explique Michael Beck, nous avons perdu plus de 90 % des marais naturels, il faut donc recréer un environnement à grande échelle prenant en compte un grand nombre d'habitants. » Mais rien n'est perdu !

L'AGENCE AMÉRICAINE DÉDIÉE AUX OCÉANS ET À L'ATMOSPHÈRE A FAIT DES LITTORAUX VIVANTS LA PIÈCE MAÎTRESSE DE SON PLAN DE RÉSILIENCE CÔTIÈRE

En 2016, les habitants de la région ont voté l'allocation de 25 millions de dollars par an pendant vingt ans pour construire 40 000 hectares de marécages en recourant à diverses techniques. La plus innovante implique des levées horizontales. À l'inverse des buttes verticales, hautes et étroites bordant la côte, les levées horizontales sont de larges bancs de boue, marais et prairies qui émergent parfois sur des centaines de mètres. Elles sont alimentées par d'immenses quantités de terre, souvent récupérées de projets de construction, et ensemencés.

Un autre signe encourageant est la Loi sur les littoraux vivants, présentée à la Chambre des représentants en 2019 par Frank Pallone, qui a vu son district dans le New Jersey dévasté par l'ouragan Sandy. L'objectif est l'attribution de 20 millions de dollars par an en subventions aux travaux de littoraux vivants. Une version sénatoriale a été présentée par Chris Murphy du Connecticut et par Kamala Harris de Californie, aujourd'hui vice-présidente des États-Unis. L'examen du projet n'est pas encore inscrit au calendrier parlementaire, mais sa seule existence montre que les littoraux vivants gagnent du terrain.

Le signe le plus prometteur est peut-être l'accord signé en 2018 par Nature Conservancy, les acteurs de l'assurance et l'État mexicain de Quintana Roo pour créer un fonds visant à protéger la barrière de corail méso-américaine, au large de Cancún et de Puerto Morelos. L'accord comprendra la toute première police d'assurance portant sur un écosystème naturel. Si le récif est endommagé par une tempête, des fonds seront alloués à sa reconstruction.

Pour que les littoraux vivants trouvent toute leur place dans la protection côtière à long terme, les décideurs doivent commencer à les installer avant que de grosses tempêtes n'éclatent. Cela requiert une science fiable et de bons modèles économiques, aujourd'hui disponibles, ainsi que de solides preuves de concept obtenues à partir de projets pilotes toujours plus nombreux.

Michael Beck s'attend à ce que le mouvement prenne de l'ampleur, notamment *via* des projets d'importance inédite financés au niveau fédéral en Floride, à Porto Rico et sur la côte du Golfe. D'autres applications de ces principes de littoraux vivants à grande échelle pourraient voir le jour ailleurs dans le monde. On se rendra alors compte que la nature n'est pas un luxe, mais un rempart contre le déchaînement des éléments. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. AIROLDI *ET AL.*, Emerging solutions to return nature to the urban ocean, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, prépublication en ligne, 2021.

P. MENÉNDEZ *ET AL.*, Assessing the effects of using high-quality data and high-resolution models in valuing flood protection services of mangroves, *Plos One*, vol. 14(8), e0220941, 2019.

M. W. BECK ET G.-M. LANGE (ÉD.), Managing coasts with natural solutions: Guidelines for measuring and valuing the coastal protection services of mangroves and coral reefs, Banque mondiale, 2016.

R. K. GITTMAN *ET AL.*, Marshes with and without sills protect estuarine shorelines from erosion better than bulkheads during a category 1 hurricane, *Ocean & Coastal Management*, vol. 102, pp. 94-102, 2014.

R. JACOBSEN, *The Living Shores*, Bloomsbury, 2009.

Bienvenue dans les villes éponges

Entre inondations et sécheresses, les villes sont confrontées à de nombreux défis aquatiques. Pour les surmonter, mieux vaut accompagner les cycles naturels plutôt que de lutter contre. C'est le principe des villes éponges.

Le parc de Yanweizhou *(au centre)*, à Jinhua, en Chine, a absorbé le surplus d'eau déversé par une mousson intense, protégeant la ville d'une inondation.

L'ESSENTIEL

- Les inondations et la sécheresse bouleversent de nombreuses zones urbaines où les chenaux de rivière en béton, les réservoirs d'eaux pluviales et les tuyaux sont vite débordés.
- L'idée de «ville éponge» aiderait plus efficacement à atténuer l'impact des inondations, économiser de l'eau pour les périodes de sécheresse et réduire la pollution.
- Le principe consiste à redonner ses droits à la nature en, par exemple, élargissant les lits de rivières et en favorisant la végétation.
- En Chine, l'architecte paysagiste Yu Kongjian est à la pointe de ce mouvement visant à accompagner les flux d'eau naturels plutôt que de lutter contre eux.

L'AUTRICE

ERICA GIES
est écrivaine et journaliste scientifique à Victoria, en Colombie-Britannique. Elle publie dans *Nature*, le *New York Times*...

Le 21 juillet 2012, Pékin a essuyé sa plus grosse tempête depuis plus de soixante ans. À mesure que le déluge s'abattait sur la ville, inondant les routes et remplissant les passages souterrains, la cité sombrait dans le chaos. On déplora 79 victimes, la plupart noyées dans leurs véhicules ou aspirées dans le réseau souterrain. Les dégâts s'élevèrent à presque 2 milliards de dollars.

Pour l'architecte paysagiste Yu Kongjian, cofondateur du cabinet internationalement reconnu Turenscape et récompensé en octobre 2020 par le prix Sir Geoffrey Jellicoe décerné par la Fédération internationale des architectes paysagistes, cette catastrophe était >

© Turenscape

FAIRE DE LA NATURE SON ALLIÉE

La date du 31 mai 1856 est devenue une référence, une référence en termes de crue lant l'eau de la Loire a débordé. Elle aurait recouvert 100 000 hectares, détruit 23 kilomètres de digues et emporté l'église de Celle-sur-Loire. Blois, Tours et d'autres villes furent submergées. Le niveau atteint par le fleuve est donc depuis une référence… pour tout projet d'aménagement du territoire afin de contenir les eaux et, en aval, veiller à leur qualité. C'est avec la protection de la biodiversité, l'une des missions de l'agence de l'eau Loire-Bretagne. Cet établissement public de l'État construit des solutions concrètes et finance des projets qui répondent aux objectifs précédents. Son programme d'intervention 2019-2024, le onzième, mobilise ainsi plus de 2 milliards d'euros au service des projets en faveur de la reconquête de la qualité des eaux et des milieux aquatiques. Les solutions fondées sur la nature, telles que décrites dans cet article, y ont une part importante. De fait, l'agence de l'eau s'est engagée avec le ministère de la Transition écologique à mobiliser chaque année du programme au moins 50 millions d'euros pour ce type de solutions sur la période 2019-2024.

Ces solutions s'appuient sur des éléments naturels existants et présentent ainsi souvent des coûts d'investissements plus faibles que la création d'infrastructures artificielles. L'efficience de l'euro public investi est donc élevée. Elles constituent des réponses fiables et pérennes à l'enjeu de préservation de la biodiversité et à la nécessaire adaptation au changement climatique.

Quelles sont ces solutions fondées sur la nature ? Elles sont de plusieurs types. Ainsi, le onzième programme d'intervention prévoit la restauration et la préservation des milieux aquatiques et des zones humides pour en faire des milieux plus résilients face aux pressions anthropiques et à même de jouer leur rôle épuratoire et tampon. Autre piste suivie, la végétalisation en milieu urbain, dans le cadre d'opérations de « désimperméabilisation », favorise l'infiltration de l'eau là où elle tombe. Ce faisant, elle prévient les inondations et améliore le cadre de vie.

Prenons un exemple. À Roanne, dans le département de la Loire, 20 % des effluents n'étaient pas traités du fait de l'incapacité des réseaux à pouvoir acheminer toutes les eaux par temps de pluie. En réaction, le syndicat Roannais de l'eau a mis en place une politique de gestion « intégrée » des eaux pluviales. Cela se traduit par l'installation d'espaces verts le plus souvent paysagés lors des réaménagements de voirie ou de l'espace public afin de faciliter l'infiltration de l'eau. Cette gestion intégrée coûte 10 à 100 fois moins cher que les solutions fondées sur la pose de tuyaux, en particulier quand les eaux sont recueillies dans des espaces verts prévus dans le programme d'aménagement.

À Saint-Jacques-de-la-Lande, au sud de Rennes, l'aménagement du territoire prévoit des espaces verts dédiées à une meilleure infiltration des eaux.

© J.L. Aubert/AELB

Aujourd'hui, déjà plus de 20 hectares ont été déconnectés des réseaux classiques avec l'aide de l'agence. Cette initiative fait des émules, car en 2020, dans le cadre de l'appel lancé par l'agence de l'eau Loire-Bretagne, de nombreuses collectivités se sont engagées dans de telles démarches comme Nantes, Rennes *(voir la photographie ci-dessous)*, La Rochelle, Blois, Orléans, Poitiers, Saint-Brieuc, Cholet… et même de petites communes tel Pezou (Loir-et-Cher), ou Ayron (Vienne). D'ailleurs, le milieu rural a aussi un rôle important à jouer, car la création d'infrastructures agroécologiques rend de nombreux services écosystémiques. Par exemple, l'implantation de haies aide à lutter contre les transferts de polluants en les piégeant dans leurs racines. Ces solutions sont préconisées dans plusieurs contrats territoriaux passés avec l'agence de l'eau qui font face à des problématiques de pollutions diffuses agricoles. Parmi ces derniers, on peut citer celui de l'Alagnon, dans le Cantal, avec 1 kilomètre de haies plantées par an. En Bretagne, le programme Breizh Bocage, cofinancé par l'agence de l'eau et l'Europe, encourage également la plantation de haies. Plus récemment et pour les années qui viennent, l'agence de l'eau Loire-Bretagne accompagne 48 expérimentations de paiement pour services environnementaux (PSE), un dispositif de rémunération des exploitants agricoles lorsque leurs pratiques sont vertueuses. Plusieurs cas prévoient la mise en place d'un maillage bocager. L'ensemble de ces solutions le montrent, il vaut mieux faire de la nature son alliée plutôt que de subir ses aléas.

MARTIN GUTTON
directeur général de l'agence de l'eau Loire-Bretagne.

Les lacs de Kazan, en Russie, étaient pollués et propices à l'inondation des alentours. Désormais, leurs berges réaménagées absorbent et nettoient les ruissellements urbains.

© Turenscapee

évitable. Il avait alerté les autorités de la ville plusieurs années auparavant, après avoir cartographié la métropole et identifié les terrains fortement inondables où l'urbanisation devrait être proscrite afin de les dédier à la gestion des eaux. « La tempête de 2012, constate-t-il, nous a appris au moins une chose : la sécurité écologique est une question de vie ou de mort. »

Et la leçon vaut pour toute la Chine. Entre 2011 et 2014, 62 % des villes du pays ont été inondées, entraînant 100 milliards de dollars de pertes économiques. Ces chiffres impressionnants résultent tant de l'intensification des tempêtes liée au réchauffement climatique que de l'urbanisation effrénée de ces trente dernières années. La disparition des marécages, des forêts, des prairies… ainsi que l'enfermement des rivières dans des camisoles de béton obligent aujourd'hui les eaux pluviales, qui filtraient autrefois à travers le sol, à stagner et à s'accumuler.

L'étalement urbain exacerbe aussi la pénurie d'eau. Les bâtiments, les rues et les parkings empêchent le rechargement des aquifères par les pluies, l'eau étant évacuée ailleurs par les tuyaux et les drains. Comme d'autres villes du nord de la Chine, Pékin est plutôt sèche en dehors de la saison des moussons estivales. Pendant des décennies, la cité a pompé les eaux souterraines pour satisfaire ses besoins. Résultat ? Le niveau de la nappe phréatique a baissé d'un mètre par an et le sol s'est affaissé.

Partout dans le monde, les grandes villes sont confrontées à des problèmes similaires et tentent de contrôler l'eau à l'aide d'infrastructures « grises » comme des barrages en béton, des levées, des réservoirs, des tuyaux… En vain le plus souvent, car, les experts le reconnaissent, en rompant le cycle naturel de l'eau, les municipalités augmentent la probabilité et la gravité des inondations. Que faire alors ?

Yu Kongjian est à l'avant-poste, avec d'autres, d'un mouvement global d'urbanistes, de gestionnaires des eaux, d'écologues et d'ingénieurs promouvant la restauration des cycles naturels de l'eau. Il s'agit d'une sorte de « non-ingénierie » : donner à l'eau assez d'espace pour qu'elle puisse s'étendre ou se contracter et ralentir son flot. Les pistes sont nombreuses : préserver ou restaurer les plaines inondables et les marais, exhumer les ruisseaux enterrés et créer des noues paysagères, des bassins de rétention, des parcs submersibles et des parkings perméables. Autre avantage, plusieurs de ces infrastructures vertes nettoient les eaux et favorisent la biodiversité. Cerise sur le gâteau, elles rapprochent les citadins de la nature, gage d'une meilleure santé mentale.

Les projets locaux d'aménagement paysagers surgissent un peu partout. Mais Yu Kongjian et d'autres spécialistes visent une plus grande échelle, celle d'une ville entière, voire d'un bassin versant. « Infrastructures vertes » en Europe, « Solutions fondées sur la nature » en France (*voir l'encadré, page ci-contre*) ou « villes éponges » en Chine, ces approches imitent la nature autant que faire se peut, explique Tony Wong, directeur général du CRCWS, un centre australien de recherches dédié à la gestion de l'eau.

UN ESPION AMÉRICAIN

L'engouement pour les villes éponges ne se dément pas. Ainsi, en mars 2018, dans son rapport « Les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau », l'ONU soutenait cette approche. Après des siècles durant lesquels ils ne juraient que par les digues, les Néerlandais sont également partants. De fait, en 1995, la catastrophe a été évitée de peu quand les niveaux du Rhin, de la Meuse et du Waal sont montés significativement, obligeant l'évacuation de 250 000 personnes. Cet événement a conduit le gouvernement à lancer le programme national « De l'espace pour les rivières ». Au lieu de ne construire que des barrages et des digues plus grands, les représentants néerlandais ont augmenté la capacité des deltas de rivières en demandant aux agriculteurs de déménager ou de laisser leurs terres être inondées en cas de nécessité. De son côté, la Chine adopte l'idée de villes éponges avec une ambition à la hauteur de ses moyens considérables.

Depuis qu'il a lancé Turenscape en 1998 avec sa femme et un ami, Yu Kongjian a fait de son entreprise un empire de l'architecture paysagère

comptant 600 employés, plus de 640 projets achevés ou en cours dans 250 villes à travers le monde. Ses débuts furent compliqués. Ses idées inspirées de l'agriculture semblaient rétrogrades à nombre de ses compatriotes. Son doctorat obtenu aux États-Unis et son opposition aux grands barrages en firent aux yeux de certains un espion américain. Mais, ces dernières années, la situation a changé. Aujourd'hui, les projets d'infrastructures vertes se multiplient en Chine, souvent en partenariat avec des Américains, des Australiens et des Européens. L'architecte paysagiste est souvent consulté, par exemple par l'ambassadeur du Mexique en Chine afin de régler les problèmes d'eau de Mexico.

C'est que l'inondation de Pékin de 2012 a marqué un tournant. Peu après, un projet de gestion de l'eau pluviale de Turenscape pour la ville de Harbin a remporté un prix du design très estimé. Puis une longue entrevue télévisée très regardée, notamment par Xi Jinping, a changé le regard porté sur les villes éponges, passées depuis du statut de concept à celui d'objectif national.

Et en 2015, le gouvernement a lancé 16 projets pilotes, chacun couvrant au moins 10 kilomètres carrés. Aujourd'hui, il en existe 30. Les objectifs incluent la réduction des inondations urbaines, la constitution de réserves d'eau, la dépollution de l'eau et l'amélioration des écosystèmes. Et dès 2017, le premier ministre Li Keqiang annonçait que les constructions de villes éponges allaient continuer de s'amplifier.

UNE RIVIÈRE RECONSTRUITE

L'un des plus récents projets de Turenscape est le Yongxing River Park, dans le district de Daxing, en banlieue de Pékin, réalisé en 2019. Il y a trois ans, il y avait un terrain ouvert entourant une rivière confinée par de hauts murs de béton. L'infiltration des eaux pluviales était particulièrement difficile du fait du développement urbain.

Aujourd'hui, le lit de la rivière a été notablement élargi, afin qu'il puisse recevoir plus d'eau, et divisé en deux canaux : la rivière proprement dite et un canal parallèle constellé de trous de profondeur variable. Pendant la saison sèche, les trous se rempliront d'effluents partiellement nettoyés provenant d'une station d'épuration. Les plantes marécageuses installées dans les bassins finiront le travail et filtreront une partie de l'eau vers des aquifères. Pendant la mousson, le canal sera réservé à l'eau des inondations, et les effluents seront traités industriellement. Le béton qui longeait la rivière a été enlevé et la terre prélevée par l'élargissement du lit a été modelée en une grosse berme entièrement végétalisée.

D'autres installations antérieures ont déjà fait la preuve de leur efficacité. Le parc de Yanweizhou, à Jinhua (*voir la photo pages 98-99*), a absorbé une inondation centennale, protégeant la ville. Les 14 hectares du parc de Houtan, à Shanghai, nettoient jusqu'à 2400 mètres cubes d'eau de rivière pollués chaque jour uniquement par des processus biologiques.

De tels projets sont plus efficaces lorsqu'ils sont connectés à d'autres infrastructures vertes dans tout le bassin versant, l'eau s'écoulant en suivant approximativement son chemin naturel. Dans toute la Chine, des villes nouvelles montrent ce qu'il est possible de faire. Turenscape a ainsi aménagé une partie de l'écocité de Wulijie, dans la province de Hubei, dont la conception préserve les marécages naturels pour qu'ils capturent et nettoient les eaux pluviales. Cette approche réduit les coûts de construction de la tuyauterie souterraine et conserve l'habitat naturel des plantes et des animaux sauvages locaux. Les bâtiments ont des jardins sur leurs toits et des murs vivants, tandis que des pistes cyclables et piétonnes émaillent cet espace vert.

À HOUSTON, ON A UN PROBLÈME

Créer de l'espace pour l'eau est plus complexe dans un environnement déjà urbanisé. Les architectes doivent insérer de minuscules projets dans des infrastructures existantes. À Houston, aux États-Unis, par exemple, les développeurs se limitent souvent à l'édification de noues paysagères dans de nouveaux complexes résidentiels. À San Francisco, des bouts de trottoirs et de terre-pleins centraux sont cassés au marteau-piqueur pour y placer des aménagements végétaux.

On comprend alors l'attrait pour les sites industriels abandonnés qui attendent leur réhabilitation : il y a tout à refaire ! Turenscape a supervisé la première phase d'un tel projet dans la cité de Kazan, en Russie, qui s'étend autour de trois lacs reliés à la Volga. Durant l'ère soviétique, la pollution a éradiqué presque toute la vie de ces plans d'eau. Par ailleurs, la manière dont ont été construits les barrages sur le fleuve rend la ville propice aux inondations. Quand les niveaux d'eaux montent, les sept stations de pompage de la ville sont dépassées.

Turenscape prévoit à terme de récupérer 11 kilomètres carrés de terrain pour les eaux de crue le long du fleuve et de ses affluents. Là, la ville construit déjà des parcs, des promenades et des noues paysagères qui ralentissent, absorbent et nettoient les eaux de ruissellement urbain avant qu'elles ne se jettent dans les lacs (*voir la photo page précédente*). De telles refontes encouragent Yu Kongjian à rêver, au-delà des villes éponges, à des « terres éponges », où tous les paysages d'un territoire, voire d'un pays, seraient pris en compte. « C'est incroyable, s'extasie Niall Kirkwood, de l'école de design de Havard (où le Chinois a obtenu un doctorat), personne d'autre ne pense à cette échelle et avec tant d'habileté politique. »

De fait, sur les murs du bureau de Yu Kongjian, des cartes du pays affichent le relief, les

© Turenscapee

bassins versants, ainsi que la biodiversité, les déserts, des indices sur la sécurité écologique, l'érosion des sols et l'héritage culturel. Utilisées avec les images satellites, elles révèlent les bouleversements paysagers de la Chine à mesure que l'urbanisation gagne du terrain et que les estuaires et les deltas s'envasent. De la sorte, l'architecte peut repérer des zones prioritaires où les projets auront un impact plus important. Niall Kirkwood compare cela à de l'acupuncture: «Travailler en un endroit précis a des incidences sur d'autres zones. C'est une approche plus holistique.»

Malgré des principes généraux, la conception de chaque ville éponge doit être unique, et prendre en compte la composition des sols, l'hydrogéologie et le climat local. Il serait dangereux que, dans leur hâte, les planificateurs chinois l'ignorent. Le cas échéant, l'attraction des villes éponges s'affaiblirait, estime Chris Zevenbergen, de l'Institut IHE, à Delft, aux Pays-Bas. La préférence pour des solutions «toutes faites» ces vingt dernières années n'a pas laissé aux constructeurs suffisamment de temps pour comprendre les défauts de conception des projets, ni pour les corriger. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle tant de villes ont aujourd'hui des problèmes avec les inondations. L'installation de villes éponges évitera-t-elle cet écueil? Les délais très courts imposés par Xi Jinping ne rendent pas Chris Zevenbergen optimiste. Autre défi des villes éponges, des investissements privés seront nécessaires pour mener à bien le plan national. Or, pour les entreprises, les digues et les tuyaux – des choses qu'elles peuvent facturer – sont plus attractifs que des systèmes naturels.

Les enjeux de cette vision vont au-delà du contrôle des inondations et des sécheresses, car Xi Jinping souhaite que les villes éponges règlent aussi le problème de la pollution. En effet, les eaux de surface chinoises charrient souvent des métaux lourds, des pesticides et des microplastiques, détaille Randy Dahlgren, de l'université de Californie, à Davis. «Si cette eau s'infiltre dans le sol, une partie de ces contaminants sera retenue dans les marais, les bassins de rétention et les noues paysagères», s'inquiète-t-il.

Des marais ne doivent pas être installés sans suivi, car du phosphore, des métaux lourds et de l'azote accumulés dans les plantes retourneraient dans les sols à la mort de ces végétaux. «Il importe de les récolter», insiste Randy Dahlgren, et, pourquoi pas, de les transformer en biocombustibles en prenant garde d'éliminer les polluants restant dans les cendres. «Une bonne gestion des marécages est impérative pour en faire des dépollueurs efficaces, dit-il. Sinon, la pollution des eaux de surface risque d'être aussi transférée aux eaux souterraines et pourrait y persister des décennies, voire des siècles.»

Lorsque ces obstacles sont franchis, les bénéfices sont parfois considérables. C'est le cas à Philadelphie, aux États-Unis, où, comme dans beaucoup de villes américaines, les eaux pluviales sont filtrées dans des stations d'épuration, saturées lors de grosses tempêtes, les eaux usées se déversant alors dans les rivières. Par le biais du programme Ville verte, eaux propres, la cité a acquis des terrains le long des cours d'eau pour absorber les excès d'eau pluviale et construit des parcs inondables si nécessaire. En outre, Philadelphie incite financièrement les propriétaires à développer des jardins de pluie, des toitures végétalisées, des fermes urbaines et des revêtements perméables. Après plus de cinq ans, la ville a «verdi» 339 hectares, assez pour réduire les débordements des stations d'épuration de plus de 5,7 millions de mètres cubes par an.

Le parc à eaux pluviales à Harbin, en Chine, fait de cette cité une ville éponge.

L'ESTHÉTIQUE DES GRANDS PIEDS

Les systèmes naturels de gestion des eaux ne sont pas statiques ni prévisibles comme le sont les infrastructures grises: la nature est chaotique. Les niveaux d'eau varient. Les plantes poussent, vivent et meurent. Le goût des résidents pour ces espaces varie. Pour que l'idée de ville éponge se propage, on doit accepter que l'environnement soit dynamique.

Yu Kongjian parle d'«esthétique des grands pieds», en référence à l'époque où les Chinois trouvaient beaux, car inutiles, les petits pieds comprimés des femmes aristocrates. Le message était qu'elles étaient trop riches pour avoir besoin de travailler. «Aujourd'hui, nous devons apprécier les grands pieds, plaide-t-il. Nous devons changer notre regard pour voir la beauté des infrastructures vertes utiles.»

Cela passe par l'évolution de l'enseignement, car les écoles continuent de former des ingénieurs selon les principes du XXe siècle. Les villes éponges ne protégeront sans doute pas tout le monde, mais selon leurs partisans leur résilience aidera à mieux faire face aux événements extrêmes que leurs alternatives en béton. Et l'environnement qu'elles offrent ne peut que rendre la vie des humains et des autres espèces vivantes plus saine. ■

BIBLIOGRAPHIE

COLL., Letters to the leaders of China: Kongjian Yu and the future of the Chinese city, Terreform, 2018.

World Water Development Report 2018: Nature-Based solutions for water, United Nations, 2018.

L'ESSENTIEL

- En 2012, des scientifiques ont été condamnés à six ans de prison ferme pour avoir sous-estimé le risque de séisme avant le tremblement de terre en avril 2009 à L'Aquila, en Italie.
- Pourtant, aucune technique ne permet de prévoir un séisme avec certitude.
- De telles controverses obligent à repenser la représentation que nous nous faisons des sciences.
- Leur responsabilité vis-à-vis de la société, une question toujours d'actualité, est au cœur de ces réflexions.

L'AUTEUR

LÉO COUTELLEC
est chercheur en épistémologie et éthique des sciences contemporaines à l'université Paris-Sud et à l'Espace éthique Île-de-France.

De la responsabilité des scientifiques face à l'aléa

Les catastrophes naturelles comme les séismes sont difficiles à anticiper. Dès lors, lorsque des scientifiques se trompent dans leurs prévisions, qui est responsable ?

Le 22 octobre 2012, un verdict très attendu a soulevé une indignation assez unanime dans la communauté scientifique. Sept scientifiques de l'Institut italien de géophysique et vulcanologie, membres de la commission italienne des grands risques, ont été condamnés à six années de prison et 9 millions d'euros d'amende pour homicide par imprudence. Les scientifiques étaient accusés d'avoir sous-estimé le risque sismique à L'Aquila. Dans cette petite ville italienne, trois ans plus tôt, le 6 avril 2009, un tremblement de terre avait causé la mort de plus de 300 personnes, saccageant le centre historique et faisant des dizaines de milliers de sans-abri.

Or six jours avant le séisme, le 31 mars 2009, les membres de la commission, jugée compétente pour l'évaluation des risques sismiques, s'étaient réunis à L'Aquila pour donner un avis sur la probabilité qu'un tremblement de terre majeur y survienne. S'appuyant sur l'analyse d'une série de secousses ayant frappé le territoire pendant les mois précédents, la commission

Le 6 avril 2009, un tremblement de terre à L'Aquila, en Italie, fit plus de 300 morts et des dégâts considérables.

© Claudio Lattanzio/epa/Corbis/Gettyimages

avait conclu, en substance, qu'il n'y avait pas lieu de s'affoler, qu'il n'y aurait pas de secousses plus importantes que les dernières. Six jours plus tard, l'Italie connaissait l'une de ses plus grandes catastrophes sismiques.

UNE OPINION SECOUÉE

La réaction fut très vive dans la communauté scientifique, notamment par l'intermédiaire d'une pétition qui soulignait qu'une telle condamnation était inacceptable parce qu'il était impossible de prédire un séisme avec précision, et donc que cette décision de justice ne prenait pas en compte la nature même de la connaissance scientifique.

On a aussi reproché au juge un verdict disproportionné et inapproprié : l'argument principal du réquisitoire contre les membres de la commission concernait le manquement aux vertus attendues de la communauté savante. Les sismologues auraient mal communiqué, avec peu de prudence et de nuances. Pour nombre de chercheurs, en convoquant ainsi l'éthique des vertus du scientifique, en se faisant police des vertus, la justice dépassait ses attributions.

Le 10 novembre 2014, les sept inculpés ont été acquittés en appel et, un an plus tard, la Cour de cassation a appuyé cette décision. Cependant, quelle que soit l'issue du procès, la responsabilité des scientifiques est à >

repenser. En effet, étant donné la portée de la science sur nos existences, cette dernière ne peut plus être vue comme une entreprise désintéressée et unifiée dont le seul objectif est l'avancement des connaissances.

QUELLE RESPONSABILITÉ ?

La responsabilité des scientifiques est engagée. Mais de quoi s'agit-il? Au-delà de sa dimension juridique ou morale, la responsabilité comporte aussi une part éthique. Et être éthiquement responsable, c'est être en capacité d'une part de «répondre de», c'est-à-dire de rendre des comptes en raison d'une mission qui nous a été confiée, et, d'autre part, de «répondre à», c'est-à-dire de prendre en considération les attentes et les interrogations des individus ou collectifs avec qui nous sommes en relation.

Il ne s'agit donc pas seulement de savoir si l'on peut prédire un séisme avec certitude (responsabilité juridique) ou d'exiger certaines vertus dans la communication à son égard (responsabilité morale). La responsabilité éthique, notamment dans sa dimension sociale, exige un travail beaucoup plus profond qui consiste à réinterroger les valeurs et les finalités de la démarche scientifique. La science repose sur diverses valeurs ayant un rapport direct avec la façon de produire les connaissances, comme la rationalité, la cohérence ou l'adéquation avec l'expérience. Mais d'autres, plus contextuelles, entrent aussi en jeu, telles que le bien-être, la justice ou l'intérêt économique. Comment prendre en compte leur influence dans le processus scientifique? Autrement dit, parler de responsabilité sociale des sciences, c'est avant tout consentir à un effort conceptuel qui vise à renouveler la représentation que l'on peut en avoir. Il ne peut donc s'agir que d'une réflexion et d'une responsabilité collectives.

Dans le cas de L'Aquila, par exemple, un aspect est peu souvent rappelé, voire jamais: les experts de la commission des grands risques, tous de grands chercheurs, sont intervenus en partie en réponse à une alerte d'un autre scientifique travaillant à l'observatoire national du Gran Sasso (le plus grand laboratoire souterrain du monde en physique des particules), qui utilisait une technique controversée – la détection de radon, notamment le radon 222. Pour ce scientifique, qui n'est pas un chercheur mais un technicien, l'émission de radon 222 serait un signe précurseur robuste de la survenance d'un séisme.

L'hypothèse du radon est connue. Elle a fait l'objet de publications et de rares revues critiques. Sept jours après le tremblement de terre, l'Institut français de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), qui étudie les émissions de radon depuis plus de vingt ans, a publié son point de vue sur cette hypothèse à la lumière des publications sur le sujet. Pour l'IRSN, si l'on enregistre bien des variations des teneurs en radon dans les zones sismiques, indiquant que la circulation des fluides souterrains est perturbée par les contraintes et déformations qui préparent ou accompagnent les tremblements de terre, on ne peut passer de ce constat à une prévision de séisme: on est en effet incapable d'associer aux variations observées des informations telles que la profondeur du foyer, l'épicentre et la magnitude d'un possible séisme.

Il n'est pas de mon ressort de juger de la pertinence de cette technique, de sa pertinence relative par rapport aux autres ou encore du bagage théorique qui la soutient. Certes, le radon ne permet pas de détecter avec certitude un séisme – tout comme les autres techniques mises en œuvre. Mais là n'est pas la question. La question est de savoir si cette hypothèse a droit à la considération scientifique au même titre que les autres hypothèses. Or elle n'a visiblement pas été prise au sérieux par la commission italienne des grands risques.

Ce fait, que l'on peut considérer comme marginal, est pourtant un révélateur de la difficulté majeure à penser la science comme le lieu d'expression d'un pluralisme. Il questionne sur la méthode scientifique elle-même, sur la façon de composer avec une multiplicité de savoirs, sur la capacité d'accueillir la diversité comme une valeur constitutive des sciences.

LA DIVERSITÉ DES POINTS DE VUE

Est-il possible aujourd'hui d'accueillir plusieurs hypothèses explicatives concurrentes qui, entre elles, sont incompatibles? Dans le cas de L'Aquila, comme dans de nombreux exemples qui font le grain des sciences contemporaines (ainsi, on s'aperçoit aujourd'hui que la maladie d'Alzheimer a d'autres facettes que seulement neurologique), la pertinence d'un savoir scientifique ne tient pas à sa capacité à évacuer le «bruit» épistémique qui dérangerait ses certitudes ou qui bousculerait le courant principal du moment, mais plutôt à accueillir en son sein la diversité des perspectives, des disciplines, des points de vue, des styles et des démarches.

Une bonne science n'est ni une science neutre ni une science sans contexte, mais une science consciente de son implication radicale dans le réel. Ainsi, l'enjeu aujourd'hui est tout autant de construire des savoirs scientifiques robustes, que des savoirs scientifiques pertinents. Et le temps des sciences impliquées exige de nous que la question de la fiabilité se pense comme une responsabilité sociale autour de critères de robustesse et de pertinence. ■

ÊTRE ÉTHIQUEMENT RESPONSABLE, C'EST ÊTRE EN CAPACITÉ DE «RÉPONDRE DE» ET DE «RÉPONDRE À»

BIBLIOGRAPHIE

L. COUTELLEC, Penser l'indissociabilité de l'éthique de la recherche, de l'intégrité scientifique et de la responsabilité sociale des sciences, *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol. 2(2), pp. 381-398, 2019.

L. COUTELLEC, *La Science au pluriel*, Quæ, 2015

L. COUTELLEC, Le temps des sciences impliquées, *Écologie & Politique*, n° 51, 2015.

L. COUTELLEC, *De la démocratie dans les sciences*, Matériologiques, 2013.

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 109 (nov. 20)
réf. DO109

N° 108 (sept. 20)
réf. DO108

N° 107 (mai 20)
réf. DO107

N° 106 (févr. 20)
réf. DO106

N° 105 (nov. 19)
réf. DO105

N° 104 (juil. 19)
réf. DO104

N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

N° 102 (fév. 19)
réf. DO102

N° 101 (nov. 18)
réf. DO101

N° 100 (août 18)
réf. DO100

N° 99 (mai 18)
réf. DO099

N° 98 (févr. 18)
réf. DO098

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **WWW.BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR**

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service VPC Pour La Science - 56 rue du Rocher - 75008 Paris - serviceclients@groupepourlascience.fr

☑ **OUI**, je commande des numéros de **Pour la Science Hors-série**, au tarif unitaire de 10,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 6 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1re réf.	0 1	x 10,90 € =	1 0 9 0 €
2e réf.		x 10,90 € =	€
3e réf.		x 10,90 € =	€
4e réf.		x 10,90 € =	€
5e réf.		x 10,90 € =	€
6e réf.		x 10,90 € =	€

TOTAL À RÉGLER €

Offre valable jusqu'au 31/12/21 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.pourlascience.fr**

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque à l'ordre de** *Pour la Science*

☐ **Carte bancaire**

N° .....

Date d'expiration .....

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

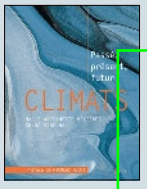
Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de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

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE

ABONNEZ-VOUS SUR WWW.BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR

À LIRE EN PLUS



Climats
Passé, présent, futur

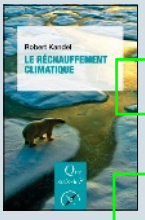
MARIE-ANTOINETTE MÉLIÈRES
CHLOÉ MARÉCHAL
BELIN, 2020
(432 PAGES, 38 EUROS)

La principale inconnue dans l'évolution future du climat et de l'environnement est la capacité de l'homme à modifier son comportement. Cette évolution, indispensable, se fera en fonction de la capacité des scientifiques et des enseignants à expliquer les enjeux, et de la mobilisation de la société mondiale. L'ambition de ce livre est donc de donner des clés pour mieux appréhender les changements actuels. Les enjeux du réchauffement climatique sont expliqués à travers la description des mécanismes à l'œuvre, l'étude des phénomènes passés et l'interprétation des scénarios futurs.

Météo extrême
Au cœur des phénomènes climatiques

GUILLAUME SÉCHET
HUGO IMAGE, 2019
(224 PAGES, 29,92 EUROS)

Dans cet ouvrage qui fait la part belle aux photos, l'auteur, météorologue expert des phénomènes climatiques extrêmes, nous plonge avec simplicité et clarté au cœur des événements météo impressionnants. À l'aide d'illustrations, d'infographies et de cartes, loin d'un jargon scientifique inadapté aux non-initiés, il explique comment se forment les phénomènes météo extrêmes et détaille l'activité et les records de chaque événement météo en France et dans le monde. Un livre pour enfin vraiment tout comprendre sur la météo et les phénomènes climatiques spectaculaires.



Le Réchauffement climatique

ROBERT KANDEL
QUE SAIS-JE?, 2019
(128 PAGES, 9 EUROS)

Psychose ou légitime préoccupation écologique, la question du réchauffement climatique revient à maintes occasions, sans pour autant que l'on sache précisément de quoi il s'agit: augmentation anormale des températures? Risques accrus ou évitables? Conséquence inéluctable de l'effet de serre? Imminence d'un choc climatique majeur? L'auteur offre une présentation claire de la situation actuelle, des différents facteurs, des évolutions envisageables et des incertitudes, sans négliger la dimension politique.

Pour éviter le chaos climatique et financier

JEAN JOUZEL ET PIERRE LARROUTUROU
ODILE JACOB, 2017
(160 PAGES, 22 EUROS)

Et si préserver notre climat était l'un des meilleurs moyens d'endiguer la prochaine crise financière? Pour sauver les banques, on a mis 1000 milliards. Pourquoi ne pas mettre 1000 milliards pour sauver le climat? Les auteurs proposent un vrai pacte finance-climat européen, pour diviser par quatre les émissions de CO_2, dégonfler la bulle financière et créer plus de 5 millions d'emplois. Il nous reste peu de temps pour inverser la courbe des émissions de gaz à effet de serre si nous voulons éviter aux jeunes d'aujourd'hui un climat auquel il leur serait difficile, voire impossible, de s'adapter.

JEUNESSE

Les Catastrophes naturelles

H. M. MOGIL ET B. G. LEVINE
LAROUSSE, 2020
(64 PAGES, 13,95 EUROS)

Cet ouvrage enchantera tous les enfants passionnés par la connaissance de notre planète et désireux de comprendre les climats et leurs manifestations les plus démesurées comme les tornades, les ouragans ou encore les coulées de boue. D'incroyables images en trois dimensions et des informations rédigées par de grands experts permettront aux jeunes lecteurs de plonger au cœur des plus impressionnantes catastrophes naturelles et de percer tous leurs secrets.

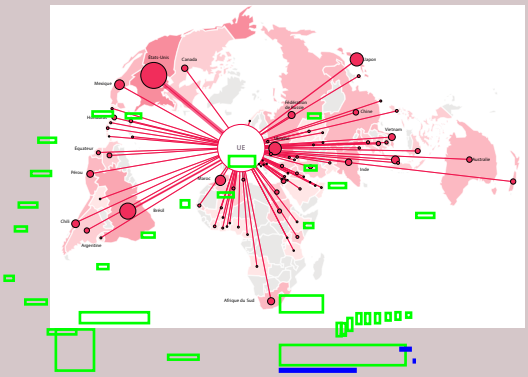
RENDEZ-VOUS

P. 110

REBONDISSEMENTS
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS

P. 114

DONNÉES À VOIR
DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

LES INCONTOURNABLES
DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS… À NE PAS MANQUER

P. 118

SPÉCIMEN
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG « BEST OF BESTIOLES »

P. 120

ART & SCIENCE
COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART

HORS-SERIE N° 109 : MICROBIOTES

Guérilla au fond des follicules

En analysant le génome d'une bactérie de la peau, des biologistes ont découvert un nouvel antibiotique efficace contre les staphylocoques, y compris des souches résistantes à certains traitements.

La peau est loin d'être un paysage tranquille, le *Hors-Série* n° 109 : « Les vrais pouvoirs des microbiotes sur la santé » montrait qu'à l'inverse, elle s'apparente plutôt à une jungle où pullulent nombre d'organismes microscopiques (bactéries, levures, virus, acariens…) : c'est le microbiote de la peau. L'équilibre de cet écosystème, gage de bonne santé pour l'individu, est maintenu selon plusieurs mécanismes, comme une acidité particulière ou bien la production d'antibiotiques. Par exemple, *Staphylococcus lugdunensis* fabrique la lugdunine, qui ralentit le développement des staphylocoques dorés. Katherine Lemon, de l'institut de microbiologie Forsyth, à Cambridge, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert un nouvel exemple d'antibiotique produit par des bactéries de la peau, et plus particulièrement dans les follicules pileux.

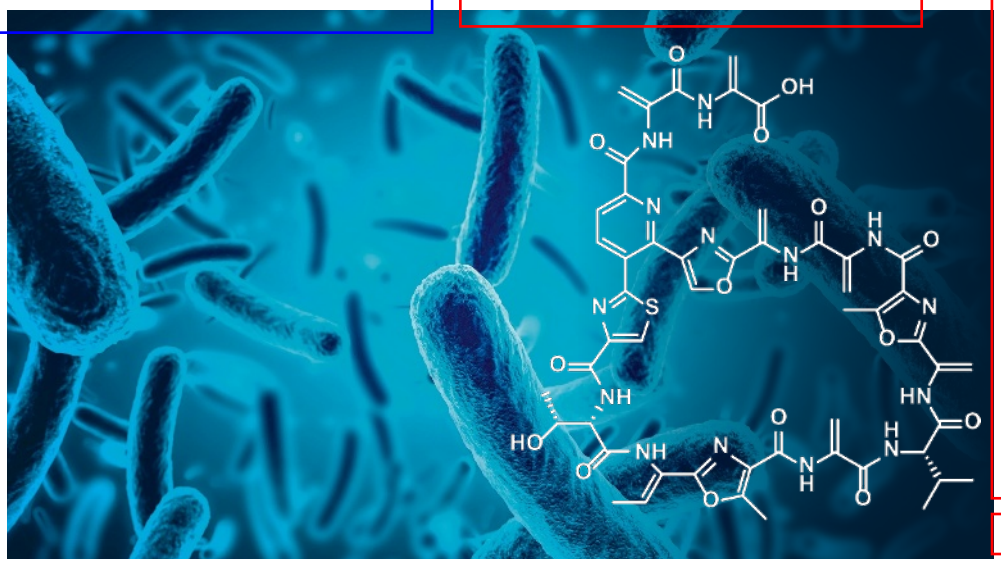
Les biologistes s'intéressaient au génome de *Cutibacterium acnes* (anciennement *Propionibacterium acnes*), une bactérie très fréquente sur la peau et dans l'ensemble des intestins, lorsqu'ils y ont découvert un groupe de gènes codant une molécule dont la structure ressemble à celle d'un antibiotique connu, la berninamycine. Ce composé de la classe des thiopeptides est produit par la bactérie *Streptomyces bernensis* et l'un de ses dérivés est commercialisé par la société Novartis, notamment pour lutter contre les infections à *Clostridioides difficile*.

Après avoir isolé et purifié cette molécule alors inconnue et désormais nommée « cutomycine », les chercheurs l'ont testée sur différentes souches bactériennes. Résultat ? La cutomycine inhibe le développement de plusieurs espèces de staphylocoques, dont le doré, y compris certains *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline. C'est une source d'espoir, car ces bactéries apparues en 1961, soit deux ans à peine après le début de l'utilisation de la méticilline, sont aujourd'hui courantes en milieu hospitalier et entraînent de nombreuses septicémies.

En revanche, la cutomycine n'a montré aucune activité contre d'autres types de microbes hôtes de la peau.

L'examen de la peau de plusieurs individus a révélé que *Streptomyces bernensis* est particulièrement bien adapté aux conditions régnant à la base des follicules pileux, un milieu riche en lipides. Là, il fait sa loi grâce à la cutomycine et tient à distance les staphylocoques. Forts de leurs résultats, les auteurs appellent à imaginer des applications du nouvel antibiotique, ou bien de souches bactériennes le produisant, pour lutter contre des maladies impliquant des staphylocoques.

J. CLAESEN *ET AL.*, *SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE*, VOL. 12(570), ART. EAAY5445, 2020



Les *Cutibacterium acnes*, hôtes de la peau, produisent un antibiotique, la cutomycine *(à droite)*.

© Wickham/J. Claesen *et al.*

La conscience en courts-métrages

Le *Hors-Série* n° 108 : « À la recherche de l'inconscient » s'interrogeait sur le moment où une information accède au statut de conscience après avoir été traitée de façon inconsciente. Michael Herzog, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, apporte sa pierre au débat en proposant un nouveau modèle selon lequel le cerveau traite et intègre les informations pendant des périodes d'inconscience de 500 millisecondes avant de rendre conscient le résultat. Ainsi, à l'inverse de ce que postulent d'autres modèles, nous ne percevrions consciemment le monde par le biais ni d'images instantanées ni d'un flux continu, mais plutôt de « courts-métrages ».

M. HERZOG *ET AL.*, *TRENDS IN COGNITIVE SCIENCE*, VOL. 4(10), PP. 826-837, 2020

Un modem quantique

Le *Hors-Série* n° 107 : « La nouvelle révolution quantique » décrivait les premiers pas d'un internet quantique, un réseau reliant des ordinateurs tout aussi quantiques. Qu'elle soit stockée dans ces derniers ou circulante dans « qWeb », l'information est sous la forme de qubits (l'équivalent quantique des bits). Mais il faut s'assurer d'un bon transfert de l'information des qubits de l'ordinateur vers ceux du réseau. En d'autres termes, on a besoin d'un modem. Le dispositif mis au point par Andreas Reiserer, de l'institut Max-Planck d'optique quantique, à Garching, en Allemagne, et ses collègues, remplit cette fonction. La clé réside dans des atomes d'erbium qui transmettent l'information quantique à des photons infrarouges constituant les qubits circulants. Énorme avantage, ce procédé pourrait s'intégrer dans le réseau actuel de fibres optiques !

B. MERKEL *ET AL.*, *PHYS. REV. X*, VOL. 10, ART. 041025, 2020

HORS-SÉRIE N° 106 : UNIVERS NOIR

Ça tourne au ralenti

Le trou noir central de la Voie lactée est-il en rotation ? S'il l'est, c'est à faible vitesse.

Ces derniers temps, les trous noirs ont occupé le devant de la scène avec de nombreux résultats, et le *Hors-Série* n° 106 : « Enquête sur l'Univers noir » s'en était fait l'écho. Tout récemment, le prix Nobel de physique 2020 a été décerné au Britannique Roger Penrose pour ses travaux théoriques sur les trous noirs ainsi qu'à l'Allemand Reinhard Genzel et l'Américaine Andrea Ghez pour leur découverte du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Ce dernier, nommé Sagittarius A* (Sgr A*) n'a pas encore livré tous ses mystères. Et notamment, on en sait peu sur sa rotation.

Abraham Loeb, de l'université Harvard, et Giacomo Fragione, de l'université Northwestern, à Evanston, aux États-Unis, se sont penchés sur la question. Pour ce faire, ils ont observé quelque quarante étoiles de type S (des étoiles géantes anciennes) en orbite à proximité de Sgr A*. Disposées selon deux plans inclinés par rapport à celui de la galaxie, elles atteignent parfois des vitesses vertigineuses proches de celle de la lumière. Les deux astrophysiciens ont recherché des traces de l'effet Lense-Thirring. De quoi s'agit-il ?

Prédit par la théorie de la relativité générale, il stipule qu'un astre en rotation déforme l'espace-temps environnant, et ce d'autant plus que la vitesse et la masse de l'astre sont grandes. Cette déformation se répercute sur le mouvement d'astres en orbite autour du premier et s'ils sont eux-mêmes en rotation, l'axe de cette rotation se décale et dessine un cône, un peu comme le fait une toupie en fin de course. On parle de précession.

Abraham Loeb et Giacomo Fragione ont donc traqué ce phénomène très ténu en guettant une éventuelle précession des étoiles de type S. En vain ! Ils en déduisent que si le trou noir supermassif Sgr A* (de quelque 4 millions de masses solaires) est en rotation, la vitesse de ce mouvement n'est pas suffisante pour déclencher un effet Lense-Thirring. Elle serait estimée à environ 10 % de la vitesse de la lumière au niveau de l'horizon de l'astre. ■

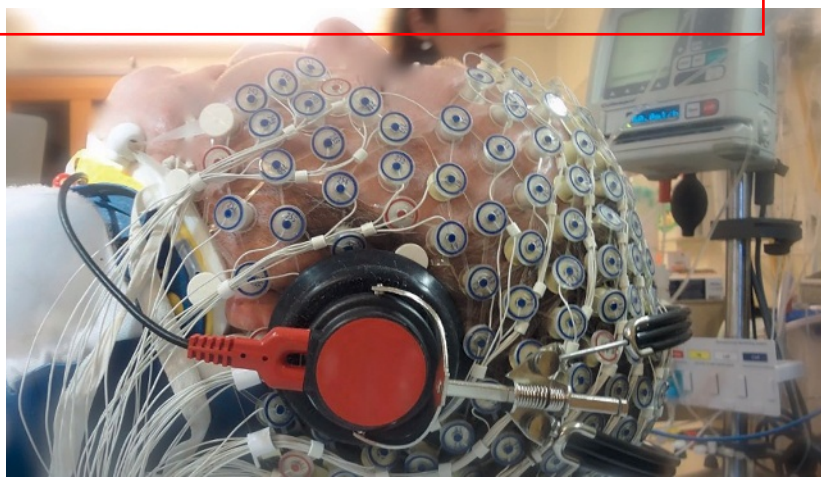
G. FRAGIONE ET A. LOEB, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, VOL. 901(2), L32, 2020

© Université de Liège

HORS-SÉRIE N° 108 : INCONSCIENT

Une conscience mieux mesurée

Des mesures électrophysiologiques sont plus appropriées que les tests comportementaux classiques pour évaluer l'état de conscience de malades plongés en sédation profonde.



Un électroencéphalogramme rend mieux compte de l'état de conscience de malades plongés en sédation profonde que les tests comportementaux classiques.

Le *Hors-Série* n° 108 : « À la recherche de l'inconscient » expliquait comment une meilleure compréhension des mécanismes de la conscience pourraient aider les médecins à mieux prendre en charge les patients inconscients en état végétatif. De fait, par exemple, dans le cas d'une pathologie incurable accompagnée d'une souffrance réfractaire aux traitements, certains malades sont plongés dans une sédation palliative plus ou moins profonde jusqu'à leur mort. Comment s'assurer de l'état de conscience et de douleur de ces individus devenus incapables de communiquer ? Stefaan Six, de l'université libre de Bruxelles et de l'université de Liège, en Belgique, remet en cause les méthodes jusqu'alors employées. En quoi consistent-elles ?

Le plus souvent, elles sont fondées sur l'observation de réactions comportementales. En ce qui concerne le degré de conscience, les médecins guettent par exemple des réactions à la voix ou au contact, évaluées notamment selon l'échelle de vigilance-agitation de Richmond. Cependant, plusieurs travaux ont montré que ces méthodes traditionnelles ont leurs limites, certains états de conscience leur échappant.

Dans une étude comparative de 108 évaluations portant sur un groupe de 12 patients, les neuroscientifiques ont mis en évidence la pertinence de mesures neurophysiologiques objectives pour évaluer conscience et douleur : on parle de « monitoring ». Il s'agit entre autres d'un électroencéphalogramme particulier dont on tire un index rendant compte de l'état de conscience. La douleur est quant à elle estimée à partir de la variabilité du rythme cardiaque.

Résultats ? Lorsqu'une possibilité de conscience a été remarquée par les instruments, dans trois quarts des cas, elle est passée inaperçue aux yeux des soignants. Stefaan Six précise également, et c'est important, que toutes les parties prenantes (médecins, infirmières, famille du malade…) ont jugé acceptable l'utilisation de ces instruments de monitoring.

Cette approche ne remplacera sans doute pas les méthodes usuelles, mais elle peut assurément les compléter dans une nouvelle façon d'envisager la sédation palliative. ■

S. SIX *ET AL.*, *PAIN AND THERAPY*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2020

HORS-SÉRIE N° 107 : RÉVOLUTION QUANTIQUE

L'horloge de Schrödinger

Des travaux théoriques révèlent comment explorer la nature du temps à l'aide d'horloges atomiques qui manifesteraient des états de superposition quantique.

La physique quantique, au cœur du *Hors-Série* n° 107 : « La nouvelle révolution quantique » est à la base de beaucoup d'objets qui nous entourent. Mais aussi efficace soit-elle, elle a néanmoins un inconvénient : elle est incompatible avec l'autre grand édifice intellectuel de la physique du XXe siècle, la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Une des difficultés pour les concilier est de comprendre quelle est la nature exacte du temps, un problème qui se pose aussi en relativité restreinte. Alexander Smith, du Collège Saint Anselm, à Manchester, aux États-Unis, et Mehdi Ahmadi, de l'université de Santa Clara, aussi aux États-Unis, ont ouvert une brèche dans le mur qui sépare les deux domaines.

À ma gauche, la relativité restreinte stipule que le temps n'est pas une grandeur absolue. Un observateur regardant l'horloge d'une personne qui s'éloigne à grande vitesse constatera que cette horloge évolue plus lentement que la sienne, en vertu d'un effet dit « de dilatation » du temps. À ma droite, un objet quantique, comme un atome, peut se trouver dans plusieurs états différents superposés. Cette propriété est illustrée par le chat de Schrödinger. Les deux physiciens proposent de superposer des états de vitesse distincts et de voir si pour chacun le temps s'écoule différemment. En un sens, il s'agirait de fabriquer une horloge de Schrödinger qui indiquerait simultanément plusieurs heures. Comment s'y prendre ?

Alexander Smith et Mehdi Ahmadi proposent de choisir comme horloge du rubidium 87, un atome radioactif dont une propriété (la transition de structures hyperfines) sert à battre la mesure du temps. Les calculs des physiciens montrent que l'on peut mettre de tels atomes dans des états de vitesse superposés puis mesurer la façon dont le temps s'écoule pour chacun d'eux. Leur réflexion pose la question de la définition du temps malléable et relatif en relativité restreinte, mais absolu et universel en physique quantique. Ils s'appuient donc sur une formulation proposée par Don Page et William Wootters qui, très schématiquement, introduit la notion de temps observable dans les équations de Schrödinger.

Les deux physiciens montrent que leurs résultats sont accessibles à l'expérience avec un exemple : des atomes de rubidium 87 peuvent être préparés avec deux états de vitesse superposés respectivement à 5 et 15 mètres par seconde. Il suffirait de maintenir la superposition pendant 10 secondes pour rendre observable la dilatation du temps quantique prévue par les équations lorsque les atomes parcourent l'espace-temps. Selon les auteurs, leurs résultats auront des implications dans la conception des horloges atomiques. Et peut-être dans le rabibochage de la physique quantique et de la relativité générale.

A. SMITH ET M. AHMADI, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 11, ART. 5360, 2020

Le temps s'écoule différemment pour les états quantiques superposés dans un même atome.

© Shutterstock.com/dani3315

Tryptophane et gluten

Les liens entre microbiote et immunité sont nombreux, le *Hors-Série* n° 109 : « Les vrais pouvoirs des microbiotes sur la santé » en faisait la démonstration. Ainsi en est-il de la maladie cœliaque, une intolérance au gluten entraînant une inflammation de l'intestin. Une équipe internationale emmenée par Harry Sokol, de l'institut Micalis, à Jouy-en-Josas, a élucidé les mécanismes sous-jacents. La pathologie résulterait d'une incapacité du microbiote à métaboliser un acide aminé, le tryptophane, en produits (des dérivés indoles) reconnus par les récepteurs AhR des cellules de l'intestin. Or l'activation de ces récepteurs contribue au renforcement de la barrière intestinale et de l'immunité. Une alimentation enrichie en tryptophane ou en probiotiques suppléant les bactéries manquantes améliore l'état des malades.

B. LAMAS *ET AL.*, *SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE*, VOL. 2(566), ART. EABA0624, 2020

Cache-cache dans la toile

La matière noire et l'énergie sombre, au centre du *Hors-Série* n° 106 : « Enquête sur l'Univers noir » ne sont pas les seules énigmes concernant le contenu de l'Univers. En effet, 40 % de la matière ordinaire échappe aux observateurs. Nabila Aghanim, de l'Institut d'astrophysique spatiale, et ses collègues, les ont peut-être dénichés. En analysant les relevés de rayons X du télescope Rosat, ils ont montré que cette matière manquante se cache sous la forme de gaz chauds dans les filaments de la toile cosmique reliant dans l'Univers les galaxies réunies en amas.

H. TANIMURA *ET AL.*, *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOL. 643, ART. L2, 2020

POUR LA SCIENCE THEMA

L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Promesses et réalité

- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €

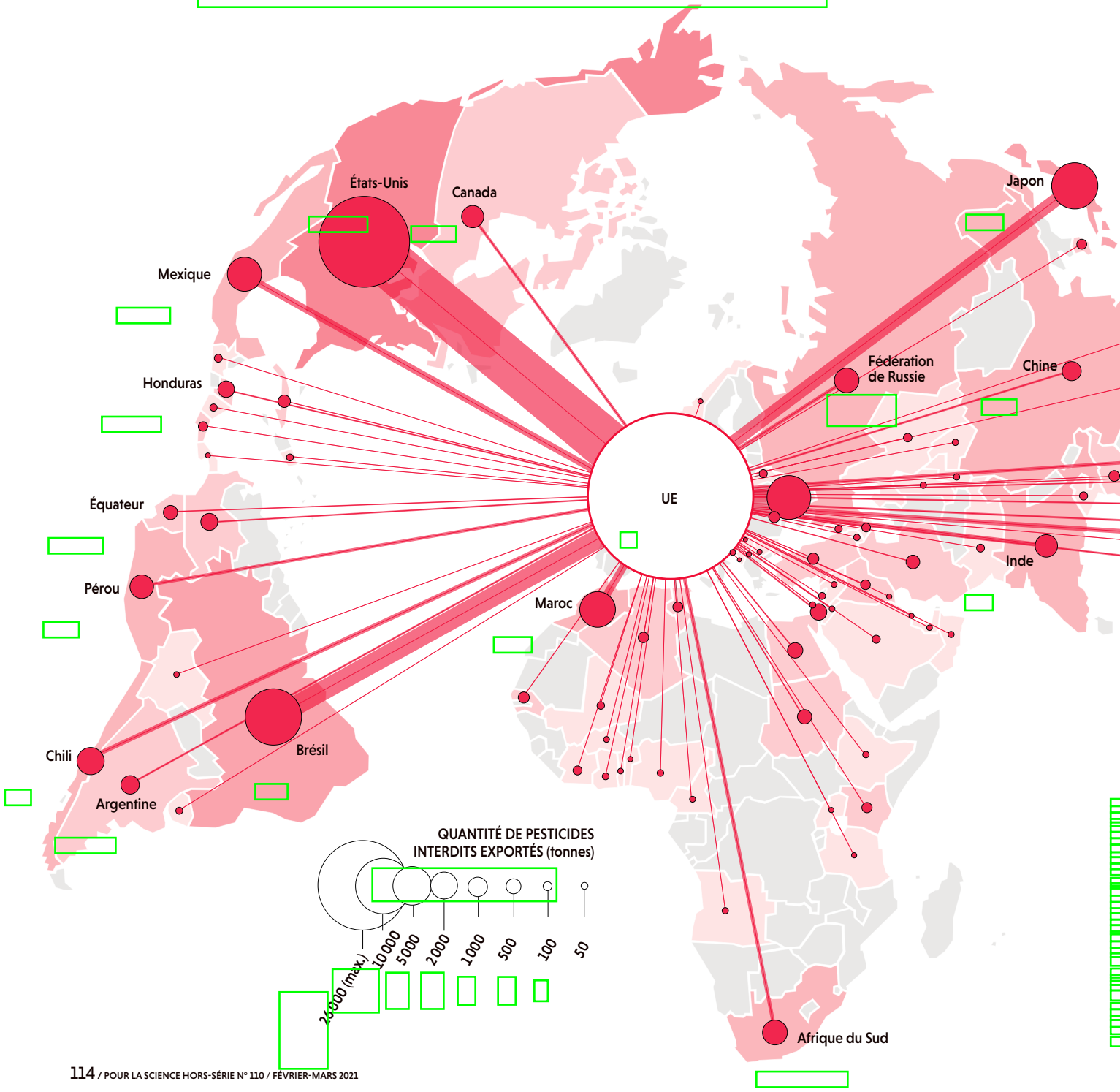
Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

www.boutique.groupepourlascience.fr

Faites ce que je dis, pas ce que je fais

L'Union européenne interdit l'usage de 41 pesticides sur son sol. Est-ce pour autant que leur fabrication a cessé ? Pas tout à fait…

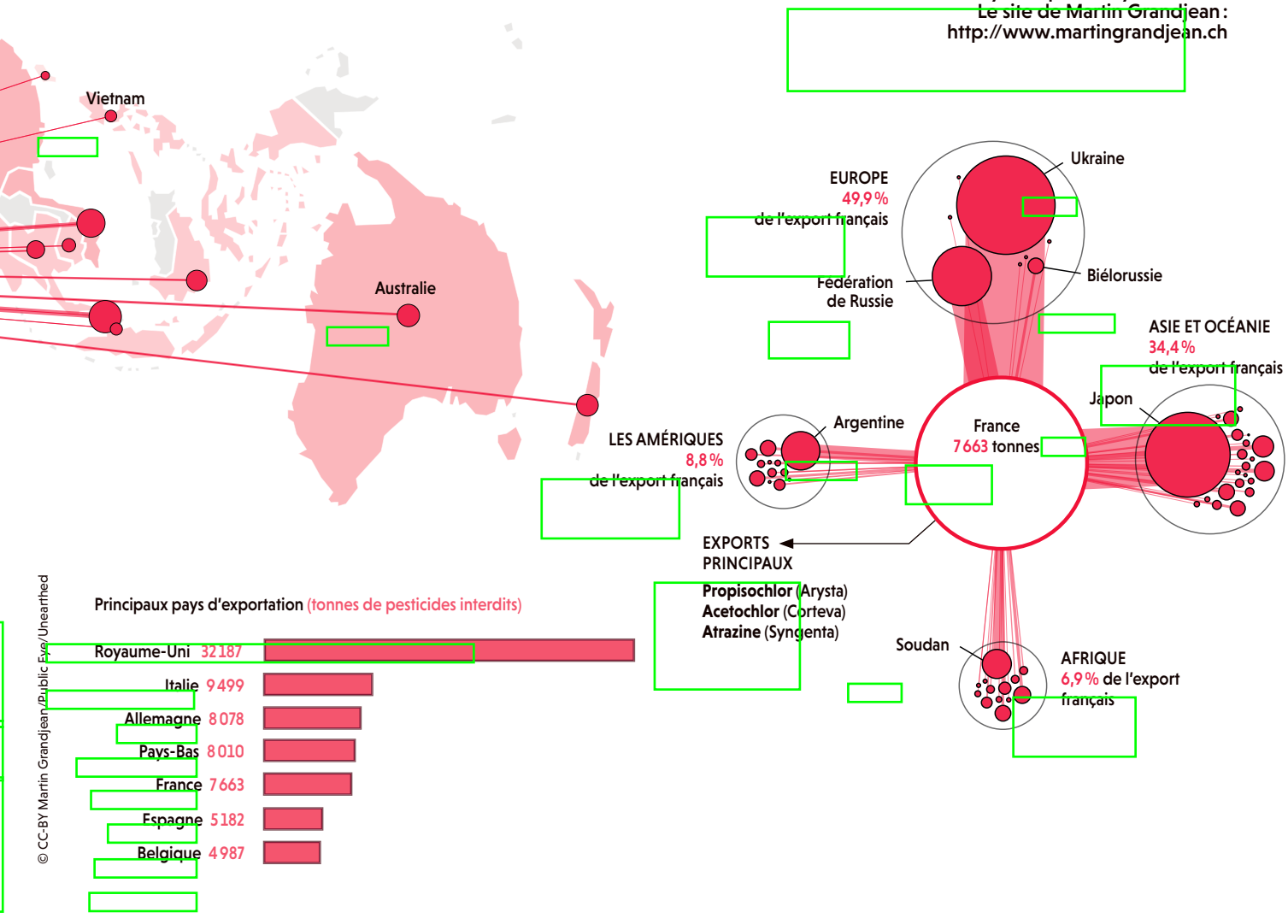


Plus de 81600 tonnes. C'est la quantité de pesticides interdits d'utilisation dans l'Union européenne (UE) et pourtant exportés depuis le continent à travers le monde en 2018. Les détails de cette situation pour le moins paradoxale ont été analysés par deux associations, la suisse Public Eye et la britannique Unearthed, qui ont eu accès à des milliers de «notifications d'exportation». Ces documents, recueillis auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (Echa), sont à remplir par toute entreprise souhaitant exporter des pesticides interdits en dehors de l'UE. Martin Grandjean, de l'université de Lausanne, en Suisse, a mis en infographie l'ensemble des données ainsi récupérées. Qu'apprend-on?

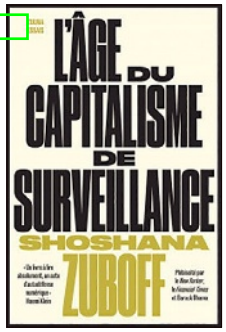
D'abord, le Royaume-Uni est sur la première marche du podium, et de très loin, avec plus de 32000 tonnes exportées. Le pays suivant, l'Italie, se «contente» de 9500 tonnes. Comment expliquer la «performance» britannique? Par le paraquat. Cet herbicide commercialisé en 1962, interdit dans l'UE depuis 2007, et toujours produit en grande quantité par la société suisse Syngenta dans son usine de Huddersfield, au Royaume-Uni. Ainsi, les autorités de ce pays ont approuvé l'exportation de plus de 28000 tonnes d'un mélange à base de paraquat vers le Brésil, le Mexique, l'Inde, l'Afrique du Sud... Mais plus de la moitié était destinée aux États-Unis!

Qu'en est-il de la France? La France est en cinquième position avec 7663 tonnes exportées, essentiellement vers l'Europe de l'Est et l'Asie. Notre pays se distingue par la plus grande disparité des produits vendus, avec 18 substances prohibées, dont l'atrazine, produit par Syngenta. Malgré un farouche lobbying mené par les fabricants, de telles exportations seront théoriquement interdites d'ici à 2022. C'est sans doute une bonne idée, car, les enquêteurs le rappellent, les principaux pays d'où l'UE importe des produits agricoles font partie des destinations privilégiées des exportations de pesticides interdits... ■

L'enquête et les données sur le site de Public Eye : https://bit.ly/PEYE-Pest
Le site de Martin Grandjean : http://www.martingrandjean.ch



À LIRE



L'Âge du capitalisme de surveillance

SHOSHANA ZUBOFF

ZULMA 2020,

864 PAGES, 26,50 EUROS

Un pavé, un pavé dans la mare dont les vagues devraient déferler dans nos têtes et nous faire regarder avec un œil horrifié nos écrans d'ordinateurs et de smartphones. Que ce soit *via* internet ou des applications, les Gafam (Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft) et consorts nous tracent, c'est connu, à des fins commerciales pour nous proposer des publicités ciblées avec toujours plus de précision. Mais ces géants vont au-delà. Selon l'autrice, professeuse émérite à la Harvard Business School, aux États-Unis, ils cherchent aussi à orienter, modifier et conditionner tous nos comportements : notre vie sociale, nos émotions, nos pensées les plus intimes… jusqu'à notre bulletin de vote. En un mot, décider à notre place. À l'aide des quantités phénoménales de données que nous laissons, que nous donnons, du « like » sur un réseau social aux informations collectées par les dizaines de traceurs que recèlent nos applications, nous alimentons des algorithmes capables d'anticiper nos actions et de les orienter vers des choix prédéfinis par des entreprises (le jeu Pokémon Go guidait les utilisateurs vers des restaurants et des magasins) ou des partis politiques (on se souvient du scandale Cambridge Analytica). Selon Shoshana Zuboff, nous ne sommes plus des sujets, ni même des « produits » que vendrait Google, mais des citrons que l'on presse pour récupérer une matière ensuite injectée dans les usines d'intelligence artificielle au service des clients réels des Gafam. Le constat est effrayant, et l'on doit en prendre conscience, comme l'y incite l'écrivaine et journaliste Naomi Klein : « Tout le monde doit lire ce livre comme un acte d'autodéfense numérique. »

Plastique, le grand emballement

NATHALIE GONTARD ET HÉLÈNE SEINGIER

STOCK, 2020

220 PAGES, 19,50 EUROS

Chaque Français jette annuellement l'équivalent de son poids en plastique. Entre un tiers et la moitié de ces déchets finissent dans un cours d'eau, dans une forêt ou dans les océans, où ils se décomposeront pendant des dizaines voire centaines d'années en fragments minuscules que le vent disséminera. Les autres, déposés dans une poubelle, seront enfouis ou incinérés. Depuis trente ans, Nathalie Gontard, chercheuse à l'Inra, enquête sur ces matériaux et tente dans cet ouvrage, coécrit avec une journaliste, de comprendre pourquoi nous en sommes tant dépendants. Selon elles, nous utilisons aujourd'hui le plastique plus par habitude que pour répondre à de réels besoins. Nous devons donc changer nos pratiques.
Les bioplastiques et des plastiques recyclés sont-ils une piste à explorer ? Non, répondent-elles, car ils nous détournent de la seule solution qui vaille : réduire notre consommation de façon drastique et la limiter à l'indispensable. Mais, pour ce faire, des décisions politiques responsables sont nécessaires. Sinon, nous allons au-devant de graves problèmes, car le plastique relâché dans l'environnement est une véritable bombe à retardement qui nuira beaucoup plus gravement aux générations futures qu'à la nôtre : ce que nous vivons aujourd'hui ne constitue que les prémices d'une pollution à grande échelle, tant nous avons produit de plastique. Le premier pas consiste à reconnaître notre addiction.

À JOUER

Le Prisonnier quantique

Le professeur Artus Cropp a disparu, emportant avec lui un incroyable secret, une découverte susceptible de changer le monde. Pour le retrouver, Zoé devra parcourir la Terre, affronter des situations périlleuses et résoudre de nombreuses énigmes. Y parviendra-t-elle ? Tout dépend de vous, car vous êtes Zoé dans ce jeu vidéo gratuit créé par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) afin de diffuser la culture scientifique et technique. Et, de fait, vous serez aux prises avec un accélérateur de particules, une pile à combustible, un robot… et peut-être même un peu de physique quantique. Vous pouvez jouer directement sur le site internet dédié, ou bien sur tablette et smartphone.

https://bit.ly/Pris-Q

À VOIR

Quand soudain j'ai vu…

… passer les étourneaux ! Et ils sont des millions à avoir été filmés par le photographe danois Søren Solkær, dans le cadre de son projet « Black Sun ». Dans une étourdissante vidéo, à l'aube au-dessus des marais, ces oiseaux migrateurs se livrent à un ballet hypnotique de « nuages » aux formes fluctuantes. Semblant réagir à des stimuli invisibles, les volutes à la cohésion mouvante se resserrent ou se dilatent, s'éloignent ou se rapprochent dans un bruissement sourd d'innombrables ailes. Un ravissement que l'on regarde en boucle.

https://bit.ly/BS-flock

À ÉCOUTER

La note, s'il vous plaît !

Médecin, hôtel, restaurant, chauffeur… à coups d'étoiles, nous notons tout ! Mais nous sommes aussi notés. D'où vient cette pratique ? Quelle place a-t-elle dans notre vie ? Quelle est l'influence de ces notes ? Doit-on leur faire confiance ? Peut-on les trafiquer ? Dans l'épisode « Pourquoi s'est-on mis à tout noter ? », du podcast « Le code a changé » proposé par France Inter, Xavier de La Porte répond à ces questions, et bien d'autres, avec Vincent Coquaz, journaliste à Libération et auteur avec Ismaël Halissat de *La Nouvelle Guerre des étoiles*, aux éditions Kero.
P.S. N'hésitez pas à écouter les autres épisodes du podcast !

https://bit.ly/LCAC-Note

À TÉLÉCHARGER

Fais comme l'oiseau

Quels sont les comportements des oiseaux à la mangeoire ? Un oiseau préfère-t-il se nourrir là où d'autres congénères sont déjà présents ou préfère-t-il s'isoler ? Comment les espèces coopèrent-elles ? Existe-t-il des comportements de compétition ou de coopération entre individus ou entre espèces ? L'habitat influence-t-il ces comportements ? De novembre à fin mars, vous pouvez aider les chercheurs à répondre à ces questions grâce à l'application Birdlab et en transformant votre jardin, votre balcon ou votre terrasse en laboratoire scientifique. Cet outil de sciences participatives a été conçu par le Muséum national d'histoire naturelle de Paris en partenariat avec la LPO et AgroParisTech. Même s'il n'est pas nécessaire d'avoir des connaissances en ornithologie, vous pouvez néanmoins améliorer celles-ci grâce à des quiz ludiques.

https://bit.ly/Obsoiseau

À VISITER

Du Velcro à l'agroécologie

À la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, découvrez comment la nature est une source infinie d'inspiration pour rendre notre monde meilleur.

L'exemple le plus connu de biomimétisme est le Velcro, inspiré à son inventeur, le Suisse George de Mestral, en 1948, par l'observation des fruits de bardane accrochés à ses vêtements. Citons aussi les fenêtres autonettoyantes exploitant l'effet lotus, les bâtiments à l'architecture empruntée aux termitières, la forme de l'avant du train japonais *Shinkansen*, copiée sur celle du bec du martin-pêcheur… Mais le biomimétisme, théorisé par l'Américain Otto Schmitt à la fin des années 1960, va bien au-delà de ces quelques objets en étant une façon de penser. C'est ce qu'entend démontrer « Bio-inspirée, une autre approche », la nouvelle exposition permanente présentée dans la serre de la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris. Pour ce faire, le visiteur est immergé dans trois écosystèmes naturels différents, reconstitués sur place et appelés à se développer au fil du temps : un récif corallien, une mangrove et un sol forestier. Un premier temps est dédié à l'exploration et à la compréhension des mécanismes sur lesquels se base le vivant à travers cinq thèmes, parmi lesquels la photosynthèse, la coopération, la notion de cycle, la sobriété, l'interdépendance… Dans un second temps, le public est invité à suivre « la voie de la bio-inspiration » durant laquelle il découvre comment la nature est une source inépuisable d'idées pour un monde meilleur. Ainsi, en s'inspirant des diatomées, les industriels ont élaboré un procédé de fabrication du verre à température et pression ambiante peu gourmand en énergie. Le stockage de données dans de l'ADN serait aussi un moyen efficace pour économiser l'énergie. Dernier exemple, l'agroécologie, qui consiste à s'appuyer sur les équilibres de la nature plutôt qu'à les perturber, est une piste importante pour une utilisation vertueuse de la terre. Enfin, un biolab complète l'exposition en offrant aux visiteurs un espace d'échanges et d'expérimentations autour de l'environnement et des organismes microscopiques. En fin de compte, on ressort convaincu : le biomimétisme est une démarche scientifique respectueuse du vivant et qui s'en inspire pour imaginer un monde plus durable et harmonieux. Léonard de Vinci le savait déjà, lui qui conseillait : « Scrute la nature, c'est là qu'est ton futur. »

Pour en savoir plus : https://bit.ly/CDS-bioinsp

Un poisson-globe trotter

En 2011, Kimiaki Ito, de la station marine Amami, au Japon, et ses collègues perçaient un étrange mystère en identifiant le responsable de structures géométriques circulaires (des rosaces de 2 mètres de diamètre) façonnées dans le sable, par 30 mètres de profondeur dans les eaux japonaises. L'artiste de *land art* sous-marin est *Torquigener albomaculosus,* une espèce de poisson-globe de 13 centimètres de longueur qui, par ce comportement tente de séduire des femelles. On croyait cette pratique limitée aux fonds entourant l'archipel nippon. Il n'en est rien! Todd Bond, de l'université d'Australie occidentale, à Perth, et ses collègues, ont découvert le même type de structures, cette fois à près de 130 mètres de profondeur, au large du nord-ouest de l'Australie. D'autres poissons-globes sont à l'œuvre, mais l'espèce n'a pas encore été identifiée. Selon les auteurs, cette découverte éclaire d'un jour nouveau l'évolution des Tétraodontidés, la famille des poissons-globes: jusqu'où l'habitude de modeler le sable est-elle répandue? ■

T. Bond *et al.*, Mystery pufferfish create elaborate circular nests at mesophotic depths in Australia, *J. of Fish Biology*, vol. 97(5), pp. 1401-1407, 2020.

© Shutterstock.com/vkilikov ; en haut à droite Courtesy by Kimiaki Ito

Les pensées du singe

Au musée d'Orsay, une exposition retrace l'influence qu'ont eue les sciences, notamment la théorie de l'évolution, sur les artistes. Avec eux, la frontière entre animalité et humanité s'estompe sous nos yeux.

En 1859, Charles Darwin publiait ***L'Origine des espèces***. À peine six ans plus tard, Gustave Courbet peignait *L'Origine du monde*. Deux œuvres qui témoignent qu'en cette deuxième moitié du XIXe siècle, le monde de la science et celui de l'art sont révolutionnés. Chacun de son côté? Non, car les artistes sont perméables aux évolutions de leur temps et donc aux bouleversements dans les sciences notamment naturelles. L'exposition « Les Origines du monde. L'invention de la nature au XIXe siècle », présentée au musée d'Orsay, à Paris, coorganisée avec le musée des Beaux-Arts de Montréal, au Canada, et en partenariat avec le Muséum national d'histoire naturelle, explore le dialogue entre ces deux mondes et les questionnements qu'ils partagent.

Le visiteur suit un parcours quasi chronologique, de l'époque où l'on imaginait la Terre et le vivant comme immuables depuis leur création divine jusqu'à nos jours, où la sixième extinction de masse menace et oblige à repenser la place de l'humain dans la nature. Entre-temps, on a découvert l'immensité du monde vivant, inscrit notre planète dans sa temporalité, et compris les liens qui unissent notre espèce aux autres. Le visiteur suit ce périple intellectuel au travers des œuvres de Bruegel, Kandinsky, Delacroix, Kupka, Redon, Munch, Mondrian, Monet, Turner, Dürer...

Un des épisodes majeurs qui a contribué, non sans remous, à remettre l'humain à sa place a été le rapprochement des humains et des grands singes. Certains artistes ont sans doute eu du mal l'admettre, en témoigne *Le Gorille traînant par les cheveux un guerrier*, d'Emmanuel Frémiet, opposant humanité et bestialité simiesque. D'autres, au contraire, ont peut-être favorisé l'acceptation de ce cousinage. Le peintre allemand Gabriel von Max est de ceux-là. De fait, comment ne pas voir dans son *Singe avec un petit bouquet de pensées* (*voir page ci-contre*), peint au tout début du XXe siècle, une tentative d'humaniser un primate. Il n'en était pas à son coup d'essai, car on lui doit aussi *Les Singes critiques d'art, Le Singe lisant, Le Singe devant un squelette*... à chaque fois, les animaux montrent des capacités d'ordinaire réservées à l'humain.

L'artiste, fervent darwiniste et adepte du spiritisme, élevait chez lui plusieurs singes qui lui servirent de modèle, et collectionnait les squelettes. Il avait pour ami Ernst Haeckel, pour qui biologie et art ne faisaient qu'un, comme le montrent ses illustrations d'organismes marins. Autre corde à son arc, le biologiste allemand avait conçu un arbre généalogique théorique de la lignée humaine et postulé l'existence d'un « chaînon manquant » entre les singes anthropoïdes et les premiers humains, qu'il nomme *Pithecanthropus alalus* (le « grand singe humain muet »). Or, en 1891, le Néerlandais Eugène Dubois, disciple de Haeckel, découvre l'Homme de Java. Il s'agit de fossiles vieux de 500000 ans découverts en Indonésie et attribués à une nouvelle espèce nommée à l'époque *Pithecanthropus erectus*. Haeckel y voit la confirmation de ses intuitions.

Gabriel von Max représenta cette découverte sous la forme d'une famille où une femelle assise allaite son jeune enfant sous le regard du mâle. Sur la toile, qui sera offerte à Haeckel, les deux adultes semblent en équilibre entre animalité et humanité. Ils ont depuis basculé du côté de cette dernière, car l'espèce a été renommée *Homo erectus* en 1960. Dans l'intervalle, que de changements! La vision linéaire de Haeckel de l'histoire de l'humanité a été remplacée par celle d'un rameau où nous figurons avec nos cousins, frêle brindille dans un buisson du vivant touffu récapitulant les liens de parenté entre toutes les espèces. Les humains y ont trouvé leur place, parfois à leur corps défendant, et aujourd'hui, l'exposition le rappelle, il conviendrait de faire en sorte qu'ils s'en contentent sans trop brusquer ce qui les entoure au risque de tout perdre.

Exposition « Les Origines du monde. L'invention de la nature au XIXe siècle », au musée d'Orsay, à Paris, jusqu'au 2 mai 2021. www.musee-orsay.fr

Un singe, presque humain entre ses pensées et ses pensées.

Gabriel von Max, *Gruss [Greeting (Monkey with Bouquet)]*, 1901-1915, huile sur bois, 24 × 16 cm.

© The Jack Daulton Collection

PROCHAIN HORS-SÉRIE

en kiosque le 7 avril 2021

© Shutterstock.com/monticello

LES DÉFIS DE

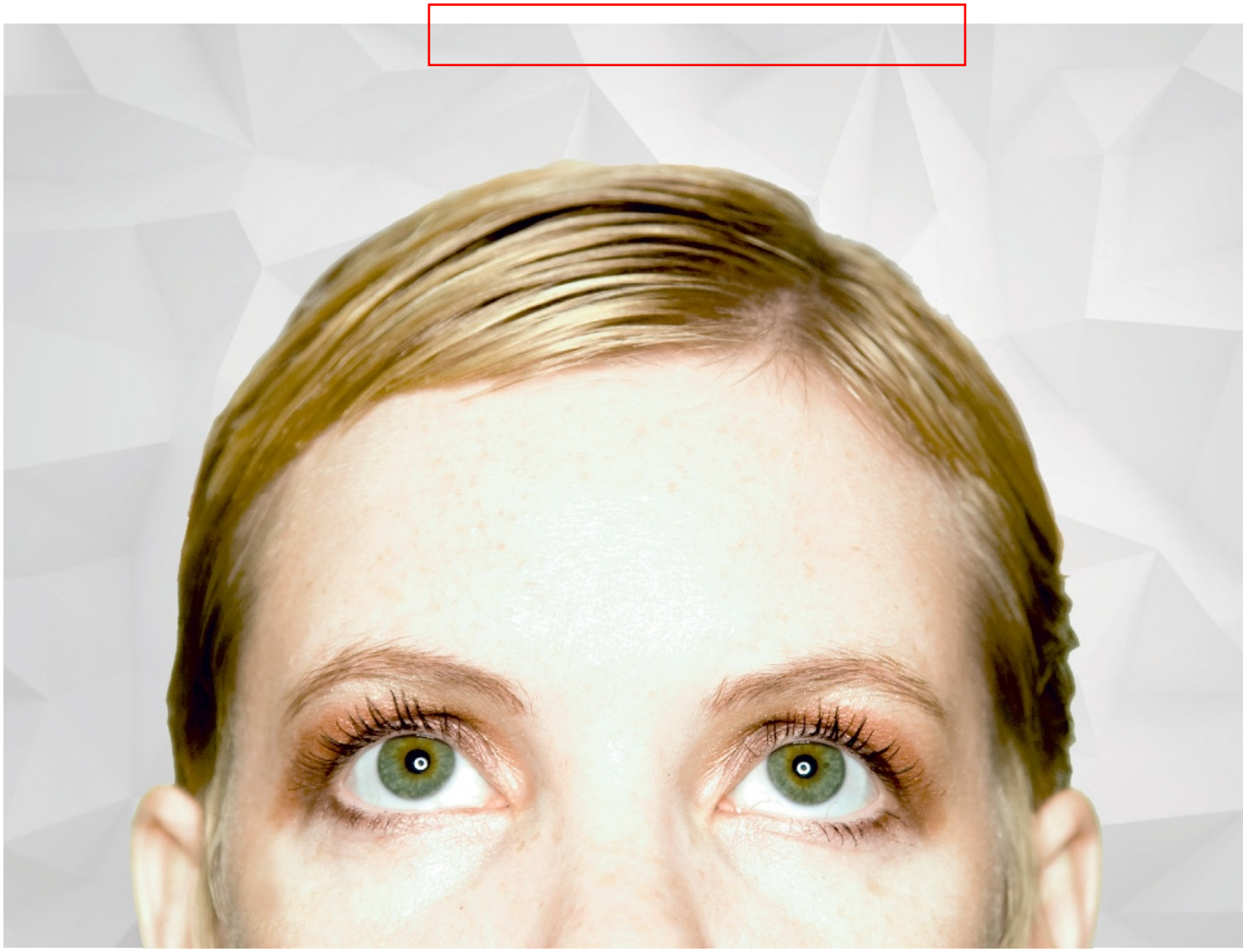
l'alimentation

Le repas à la française a beau être désormais inscrit au patrimoine immatériel de l'humanité par l'Unesco, il n'en demeure pas moins que l'alimentation soulève de nombreuses questions liées à la santé et à l'environnement. Que penser des régimes ? Comment soigner les dérèglements comme l'anorexie et la boulimie ? Quelle est la part de l'alimentation dans le réchauffement climatique ? Comment nourrir 10 milliards d'humains ?

Imprimé en France – Maury imprimeur S.A. Malesherbes – N° d'imprimeur : 250 528 – N° d'édition : M0770110-01 – Dépôt légal : Janvier 2021.
Commission paritaire n° 0922K82079 du 19-09-02 – Distribution : MLP – ISSN 1 246-7685 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

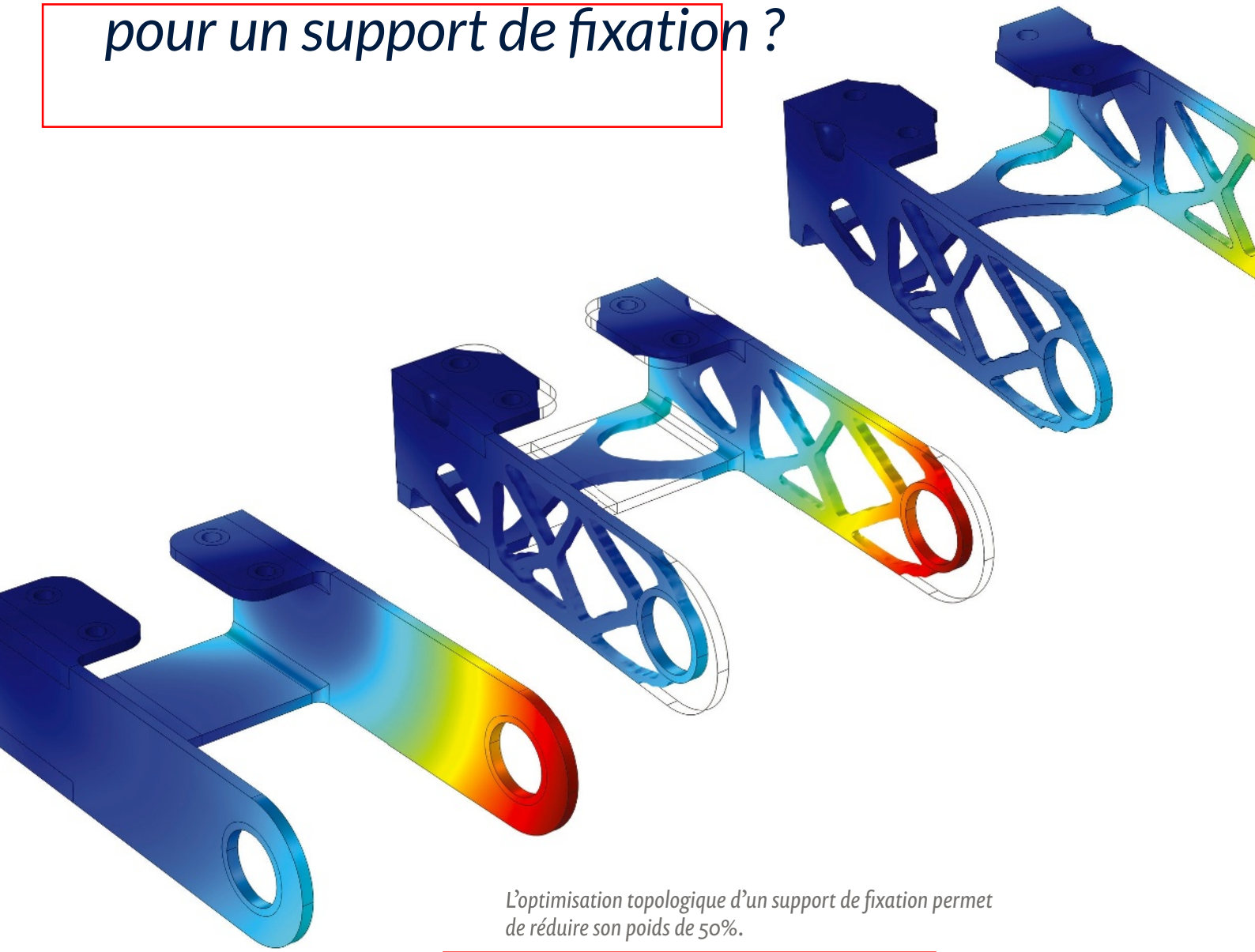
Spektrum der Wissenschaft

nature

Pour la Science

www.academia-net.org

Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour l'optimisation topologique.

comsol.blog/density-topology

COMSOL