POUR LA SCIENCE
Edition française de Scientific American
HORS-SÉRIE
M 01930 - 104H - F: 7,90 € - RD
AOÛT-SEPTEMBRE 2019
Nº 104

DÉCOUVERTE
CES BACTÉRIES QUI MANGENT LE PLASTIQUE

PRÉSERVATION
POUR SAUVER LE CORAIL CULTIVONS-LE

MICROBES
LES VIRUS BROUILLENT L'IDÉE DE VIE

MÉDUSES
LE SECRET D'UN SUCCÈS URTICANT

GRAND TÉMOIN
BRUNO DAVID

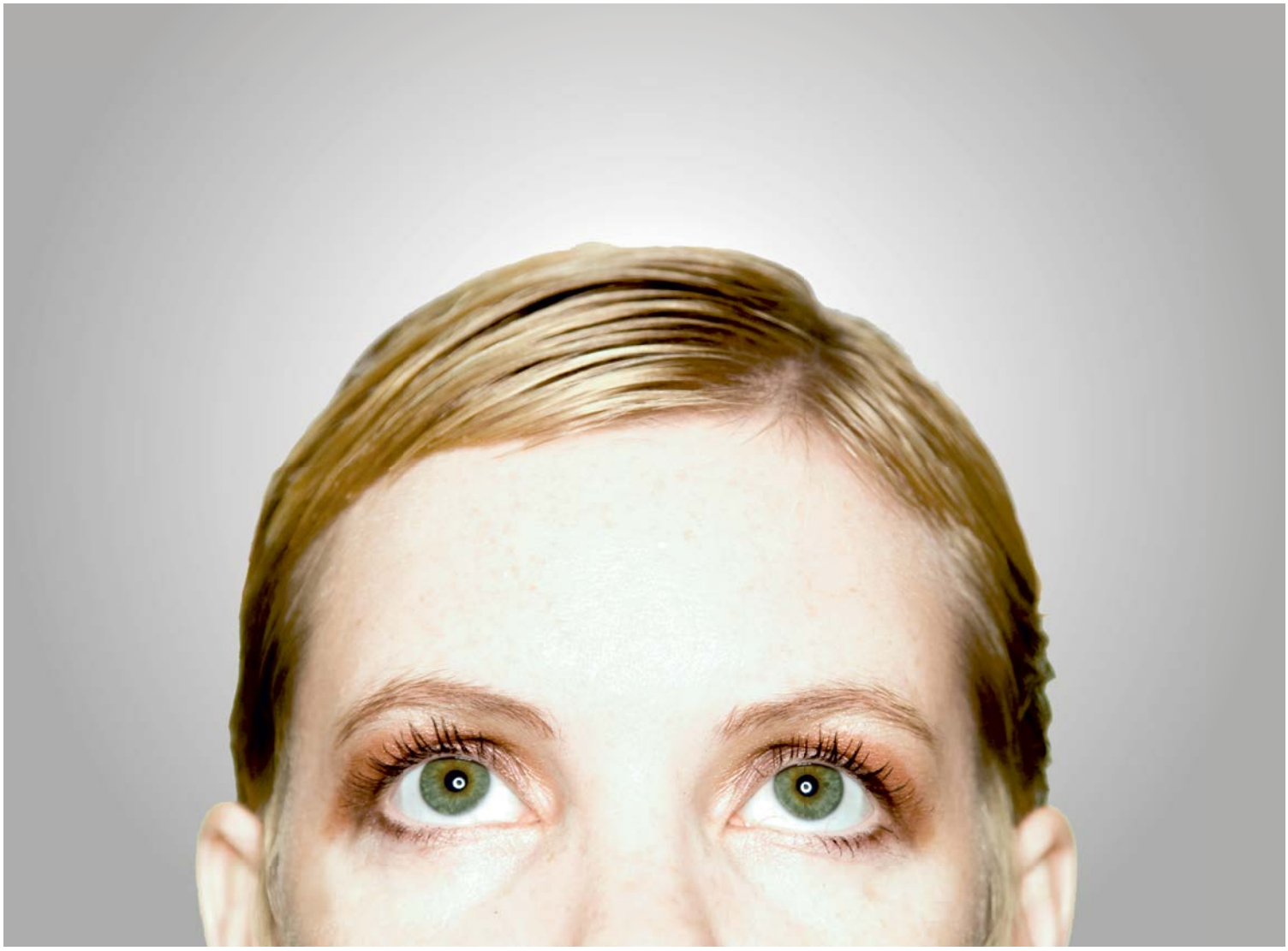
OCÉANS

LE DERNIER CONTINENT À EXPLORER

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
BEL : 9,40 € - CAN : 13,20 CAD - DOM/S : 9,40 € - ESP : 8,95 € - GR : 8,95 € - LUX : 8,95 € - MAR : 105 MAD - TOM/A : 2400 XPF - TOM/S : 1320 XPF - PORT CONT : 8,90 € - CH : 17,10 CHF

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 des 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«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

nature

POUR LA SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American
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
Maquettiste: Ghislaine Salmon-Legagneur
Réviseuses: Maud Bruguière, Chantal Ducoux, Anne-Rozenn Jouble

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétariat général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
A également participé à ce numéro: William Rowe-Pirra

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: http://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél.: 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements
Pour la Science – 19 rue de l'Industrie – BP 90053
67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an (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: Mariette DiChristina
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

ÉDITORIAL

LOÏC MANGIN
Rédacteur en chef adjoint

La vie devant soi. Vraiment ?

«Ce qui se passe dans nos mers est pire que la peste au Moyen Âge», se désespérait en 1974 Romain Gary, dont l'œuvre vient d'entrer dans *La Pléiade*. «Il a fallu à la vie plus de cent millions d'années pour produire la tortue de mer géante, la baleine et le phoque moine. Il nous a suffi de trois générations pour en arriver à un point où la disparition totale paraît presque inévitable.»

Quelque trente-cinq ans plus tard, où en est-on? Les océans restent un territoire aussi vaste qu'inconnu et dont l'exploration n'en est qu'à ses balbutiements. Pour aller de l'avant, le 11 juin 2019 à Paris, les plus grands experts européens de l'océan (Ifremer, CNRS, Sorbonne Université…) ont publié *Navigating the Future V*, un document de référence destiné à guider les gouvernements européens sur les recherches océaniques et maritimes à mener jusqu'en 2030 et au-delà.

Et chaque domaine de recherche défini dans cet état des lieux de la science nécessaire inclut une part importante dédiée à la préservation, la protection et même la restauration du milieu marin déjà si menacé par le réchauffement climatique, la pollution, la surexploitation… Et le temps presse.

Dans la préface à l'édition de 1980 des *Racines du ciel*, prix Goncourt en 1956 (son premier), Romain Gary confiait que «les hommes ont toujours donné le meilleur d'eux-mêmes pour conserver une certaine beauté à la vie. Une certaine beauté naturelle…» Entre science, découverte et protection, plusieurs articles de ce *Hors-Série* abondent en son sens et font apparaître, pour les océans… la promesse d'une nouvelle aube.

SOMMAIRE

POUR LA SCIENCE HORS-SÉRIE
N° 104
Août-septembre 2019

Océans

LE DERNIER CONTINENT À EXPLORER

MER ET MERVEILLES

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

pourlascience.fr

P. 6
Repères
L'indispensable pour apprécier ce numéro.

P. 8
Avant-propos
BRUNO DAVID
« Seuls quatre hommes ont plongé à plus de 10 000 mètres de profondeur, douze sont allés sur la Lune »

P. 14
Les coraux venus du froid
André Freiwald
Contre toute attente, des coraux vivent dans les profondeurs et jusqu'aux latitudes polaires.

P. 22
Des roses tapies au fond des mers
Nadine Le Bris
Les sites hydrothermaux sont des havres pour une multitude d'organismes.

P. 28 Entretien
« Plusieurs milliers d'espèces de plancton repérées par *Tara Oceans* sont inconnues »
Éric Karsenti

P. 32 Portfolio
Autant en emporte l'océan
Parmi le plancton se cachent des joyaux, des chefs-d'œuvre d'orfèvrerie miniatures.

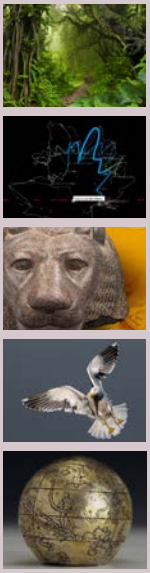
P. 36
Les virus, piliers de la vie marine
Stéphan Jacquet et Caroline Depecker
Abondants et variés, les virus aquatiques sont des acteurs clés des écosystèmes marins.

P. 44
Les bactéries qui aimaient le plastique
Elizabeth Svoboda
Maria-Luiza Pedrotti explore le monde inconnu des bactéries mangeuses de plastique.

En couverture :
© Harvepino / shutterstock.com

VEILLER AU GRAIN

AVIS DE TEMPÊTE



RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 52
Des pouponnières pour le corail
Rebecca Albright
Le réchauffement océanique menace les coraux. Peut-on les sauver en les cultivant?

P. 60
La haute mer, terre de découvertes
Romain Troublé
L'exploration scientifique de la haute mer est un enjeu écologique planétaire!

P. 64
L'océan Austral, un modèle?
Robert Calcagno
L'océan Austral bénéficie d'un mode de gestion original. Renforçons-le!

P. 68
Des aires protégées ou désert marin?
Hélène Le Meur
Préserver la biodiversité marine et respecter les impératifs socioéconomiques: c'est possible!

P. 70 Portfolio
La mer, un coffre aux trésors
Toutes les solutions apportées à l'humanité par l'océan: médecine, nourriture, matériaux...

P. 74
Au chevet des tortues marines
Robert Calcagno
À l'avenir, quelle place pourrons-nous laisser aux tortues marines, et comment?

P. 82
L'invasion des méduses
Corinne Bussi-Copin et Jacqueline Goy
Rien ne semble enrayer l'essor des méduses, si fragiles et rudimentaires, en apparence.

P. 90 En images
Et pourtant, elle monte
Où s'arrêtera la hausse du niveau marin?

P. 92
Les fonds des océans font grise mine
Thomas Peacock et Matthew Alford
L'exploitation des métaux des grands fonds serait néfaste. Peut-on limiter les dégâts?

P. 100
À bout de souffle
Clarissa Karthäuser, Andreas Oschlies et Christiane Schelten
Dans les océans, d'immenses zones appauvries en oxygène s'étendent. Pourquoi?

P. 108
À lire en plus

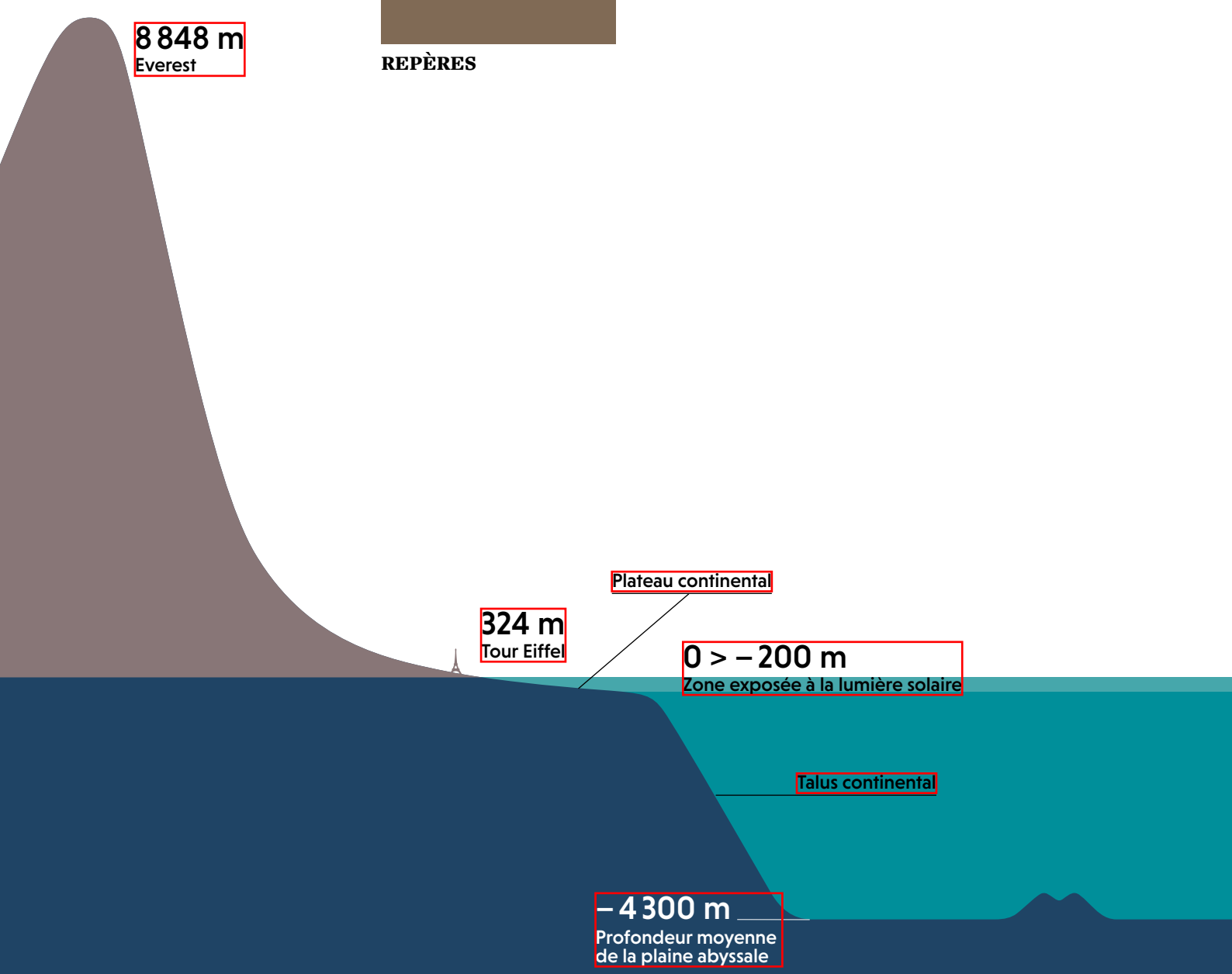
P. 110
Rebondissements
L'énigme de la capsule temporelle est résolue! • Pastèque et musique nigériane • Le World Wood Wide Web • Alzheimer: la maladie à deux prions •

P. 114
Données à voir
Prendre le train, prendre le temps

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

P. 118
Spécimen
Le goéland, un serial killer!

P. 120
Art & Science
En sphère et contre tout



Les plaines abyssales

Avec environ 307 millions de kilomètres carrés, elles représentent l'essentiel des fonds marins. Plates, elles s'étendent entre 4 000 et 6 000 mètres de profondeur. Ces plaines sont recouvertes de sédiments et de « neige marine », celle-ci étant constituée de squelettes d'organismes, de déjections, de poussières… agglomérées en « flocons ». On trouve également des nodules polymétalliques. Longtemps supposés peu propices à la vie, on y a découvert des espèces vivantes dans les années 1970. La vie y est néanmoins clairsemée, avec des espèces de petite taille.

Les dorsales océaniques

Ces chaînes de montagnes sous-marines marquent la frontière entre deux plaques tectoniques. Elles se rencontrent dans tous les bassins océaniques. Le réseau de ces dorsales est continu et s'étend sur plus de 60 000 kilomètres. Elles sont constituées du magma qui remonte du manteau terrestre à cet endroit. Les sources hydrothermales – et leurs écosystèmes si particuliers – sont essentiellement réparties le long de ces dorsales.

© Pour la Science

Paré à plonger !

Avec environ 361 millions de kilomètres carrés, les océans couvrent 71% de la surface terrestre. Plus encore, ils représentent 96% du volume biosphérique, c'est-à-dire dédié à la vie. De fait, avec une profondeur moyenne de quelque 3700 mètres, les océans sont surtout un volume gigantesque, de plus de 1,37 milliard de kilomètres cubes.

La vie s'y étend dans toutes les dimensions et s'est installée partout, ou presque, dans la colonne d'eau et sur les fonds marins, du plateau continental jusqu'à la fosse des Mariannes. L'océan abrite de 50 à 80%, selon les estimations, des espèces vivantes.

Il régule également à plus de 80% le climat de la Terre.

Si grand, si omniprésent, et pourtant, l'océan demeure pour une grande part encore inconnu. Il est temps de s'immerger pour partir à sa découverte ! ■

Les monts sous-marins

Ces reliefs souvent assez abrupts s'élèvent brusquement au-dessus des plaines abyssales, jusqu'à parfois 4 000 mètres de hauteur. Environ 100 000 monts sous-marins sont répertoriés, mais seuls quelques-uns (environ 1 %) ont été étudiés *in situ*. Ces monts sont souvent d'anciens volcans éteints, ou bien nés des mouvements des plaques tectoniques. Chaque mont, ou chaîne de monts, constitue un *hot spot* de biodiversité réunissant de nombreuses espèces uniques qui ne se sont développées nulle part ailleurs.

– 11 000 m
La fosse des Mariannes

Les fosses océaniques

Ces dépressions océaniques sont souvent situées dans les zones de subduction (là où une plaque tectonique passe sous une autre). On en trouve également dans les zones où deux plaques océaniques s'éloignent l'une de l'autre. La fosse la plus profonde connue est celle des Mariannes, dans la partie nord-ouest de l'océan Pacifique. Selon les derniers relevés, toujours difficiles à réaliser, la profondeur atteindrait 10 971 mètres. En mai 2019, l'Américain Victor Vescovo a plongé dans la fosse jusqu'à 10 928 mètres de profondeur. Au fond des fosses, malgré des pressions atteignant 1100 atmosphères, vivraient des organismes dits « piézophiles », c'est-à-dire inféodées aux pressions hyperbares.

BRUNO DAVID

« Seuls quatre hommes ont plongé à plus de 10 000 mètres de profondeur, douze sont allés sur la Lune »

On dit que l'on connaît moins les océans que la Lune : qu'en est-il vraiment ?

Bruno David : Effectivement, même si bien sûr on connaît assez bien les zones proches des continents, l'humanité n'a exploré qu'une toute petite partie des profondeurs océaniques. Paradoxalement, on a une idée moins précise de ce à quoi ressemblent les profondeurs océaniques que certaines planètes. En nombre d'individus, seuls quatre (Jacques Piccard, Don Walsh, James Cameron et tout récemment Victor Vescovo) ont plongé à plus de 10 000 mètres de profondeur, dans la fosse des Mariannes, l'endroit le plus profond du monde (10 971 mètres), alors que douze hommes sont allés sur la Lune.

Même du simple point de vue de la cartographie, le fond des océans est mal connu, et il peut même réserver des surprises. Ce fut le cas en 2013, lors de ma dernière grande mission avant d'être nommé président du Muséum. Nous étions dans l'océan Austral quand, un matin, au réveil, l'équipage nous apprend que le navire aurait pu couler durant la nuit ! En pleine mer de Weddell, en Antarctique, nous aurions tous péri. Le bateau était passé au-dessus d'un mont sous-marin inconnu, non répertorié, d'environ un kilomètre de long et qui culminait à 20 mètres seulement de profondeur. Tout autour, les fonds atteignaient 500 mètres. Nous avions trouvé une taupinière dans la Beauce !

Avec nos 12 mètres de tirant d'eau, huit mètres de plus, et la situation aurait pu être dramatique. Nous en avons profité pour l'explorer, le cartographier et le baptiser *Nachtigaller*, c'est-à-dire *Rossignol* en allemand (la nationalité du navire) en référence à un personnage de roman.

Cette anecdote montre bien que l'on est loin de tout savoir sur la topographie des fonds océaniques. Même à faible profondeur, il reste encore des choses à découvrir.

BIO EXPRESS

1954
Naissance à Lyon.

1979
Thèse sur les échinides (oursins) du Crétacé inférieur.

1996
Directeur du laboratoire de Paléontologie du CNRS à Dijon, devenu Biogéosciences.

2011
Directeur adjoint scientifique de l'Institut écologie et environnement du CNRS, en charge de la biodiversité.

2015
Président du Muséum national d'histoire naturelle.

© Al Jazoura - MNHN

Et l'espace n'est d'aucun secours ?

Bruno David : Non, les satellites ne renseignent que sur la surface. L'exploration des fonds marins et leur cartographie nécessitent un bateau équipé d'un sonar. Toutes nos informations proviennent de navires qui ont sillonné les mers. En certains endroits reculés, les données sont parfois imprécises et ce que l'on pense être une plaine abyssale homogène ne l'est pas. Il y a encore des *mare incognita*.

Comment expliquer cet écart de connaissances entre la Lune et les fonds marins ?

Bruno David : Les océans paraissent proches, mais paradoxalement, il est très difficile d'aller dans l'eau. Nous ne sommes pas faits pour. C'est aussi le cas de l'espace, mais nous avons probablement alloué plus de moyens pour y aller, que pour explorer le fond des mers. Cet écart devrait diminuer dans les prochaines années, notamment grâce à des engins automatisés. Mais le plancher océanique reste un environnement très hostile, ne serait-ce qu'en termes de pression.

Peut-on un jour trouver un endroit plus profond encore que les Mariannes ?

Bruno David : Extrêmement improbable, car nous savons où trouver les très grandes profondeurs. Nous sommes attirés par les extrêmes, que ce soit les plus hauts sommets montagneux ou les endroits les plus profonds. De fait, ces fosses ont été découvertes très tôt, par exemple celle des Caïmans (plus de 7000 mètres de profondeur), en 1873. Et désormais, nous savons que les fosses sont au niveau des zones de subduction, où une plaque tectonique plonge sous une autre. En connaissant le mécanisme de fabrication, on a su où chercher, même si les plus grandes profondeurs avaient déjà été repérées.

Le paysage sous-marin évolue, mais à une vitesse géologique. Rendez-vous dans 500000 ans pour peut-être voir le record des Mariannes battu. On peut aussi prendre date pour la fermeture de la Méditerranée. Cette mer est l'héritière d'un immense océan, la Téthys, qui rétrécit inexorablement. D'ailleurs, au sud de la Grèce, en Crète, on voit bien la suture de la subduction avec l'Afrique. La Méditerranée va devenir un lac puis éventuellement s'évaporer.

A l'inverse, un océan est peut-être en train de naître en Afrique de l'Est, où l'on observe une zone de divergence, un rift, qui préfigure un océan. Difficile néanmoins d'être catégorique, car on connaît des exemples de rifts qui ont avorté. Ainsi, l'Alsace est un rift, entre la Forêt-Noire et les Vosges, qui s'est ouvert l'Oligocène, il y a 40 millions d'années. Puis il s'est arrêté... Strasbourg aurait pu être sous l'eau.

On est loin de tout savoir sur la topographie des fonds océaniques. Même à faible profondeur, il reste encore des choses à découvrir !

Peut-on tenter d'établir une carte d'identité des océans ?

Bruno David : Ils représentent 71% de la surface de la Terre, c'est connu. Ils constituent également 96% du volume biosphérique, c'est-à-dire offert à la vie. Sur les continents, la vie n'occupe qu'une pellicule à la surface, au niveau des sols, et dans les airs, où volent les oiseaux. En revanche, dans les océans, on trouve de la vie dans toute la colonne d'eau. Ce volume biosphérique correspond au final à une enveloppe de 3700mètres d'épaisseur moyenne sur 71% de la planète.

Autre aspect intéressant, les océans sont orientés selon un axe nord-sud. Ce ne fut pas toujours le cas! La Téthys dont nous avons parlé était orientée est-ouest. Et ça change tout, notamment en termes de biodiversité. Ainsi, pour le corail, nous avons aujourd'hui des récifs dans les différents océans qui sont autant de zones indépendantes pour leur évolution. En revanche, dans la Téthys, la ceinture climatique tropicale était d'un seul tenant. La structuration spatiale du vivant était plus homogène.

Quels sont les grands jalons de l'exploration des océans ?

Bruno David : Pendant des siècles, elle s'est résumée à... rien. La pression hydrostatique liée à la colonne d'eau empêche de respirer, même *via* un tuba, au-delà d'un mètre de profondeur: les muscles respiratoires deviennent inopérants. On peut bien injecter de l'air sous pression (ce que font les Dupond & Dupont dans *Tintin et le trésor de Rackam le rouge*) pour contrer la pression, mais on est vite limité.

L'avancée majeure est le scaphandre autonome, mis au point dans sa forme actuelle par Jacques-Yves Cousteau et Émile Gagnan en 1943. Dès lors, on pouvait descendre jusqu'à 50 mètres de profondeur. Une vraie liberté!

Toutefois, dès le XIXe siècle, de grandes expéditions océanographiques ont commencé à révéler les secrets des fonds marins grâce à des dragues, des chaluts... L'histoire du britannique Edward Forbes mérite d'être rappelée. En mer Égée, il constate que la vie se raréfie avec la profondeur et propose donc, en 1843, qu'il n'y a plus de vie au-delà de 500 mètres. Pourtant, 10 ans plus tard, le câble télégraphique reliant la Sardaigne à l'Afrique du Nord se rompt. Il est remonté et l'on y découvre des organismes fixés qui vivaient à quelque 2000 mètres de profondeur.

Les Anglais piqués au vif – nous sommes à l'époque du grand empire britannique de la reine Victoria – diligentent les premiers vrais bateaux océanographiques, d'abord de petits vaisseaux, comme la corvette *Lightning* (*L'Éclair*) puis d'imposants navires militaires désarmés et réaménagés. L'un d'eux, le *Challenger* effectue le premier tour du monde et découvre la vie à 7000 mètres de profondeur dans les Caïmans. On se rend compte que la vie est partout. Viennent ensuite les expéditions d'Albert 1er de Monaco. Tous les pays s'y mettent, chacun arme ses bateaux dédiés. On assiste à une sorte de compétition de connaissances, mais aussi pour l'appropriation de nouveaux territoires. L'affaire prend un tour politique. Finalement, c'est un peu comme pour la conquête de l'espace.

Le mouvement prend de l'ampleur jusqu'à la Première Guerre mondiale, ralentit, puis redémarre avec force après la Seconde Guerre mondiale, avec notamment tous les sous-marins d'exploration.

Où en est-on aujourd'hui ?

Bruno David : Beaucoup d'efforts portent notamment sur l'océan Austral qui reste mal connu. Plusieurs pays l'explorent, comme l'Angleterre, l'Australie, le Japon... Les Allemands sont parmi les mieux équipés, avec le *Polarstern*, un bateau extraordinaire sur lequel j'ai eu la chance d'embarquer.

La France est quant à elle peu présente dans cette zone, car dépourvue de bateau dédié. Elle est en revanche bien armée pour le subantarctique, à l'écart des glaces. On peut citer les installations aux Kerguelen, à Crozet… ainsi que les nombreuses expéditions du *Marion Dufresne*. Nous disposons également de bases en Antarctique où des scientifiques invités peuvent faire de la glaciologie, de l'ornithologie…

En dehors de l'Antarctique, la flotte océanographique française (la FOF), entretenue et mise à la disposition de la communauté scientifique par l'Ifremer est fantastique, et puis le *Nautile* est un sous-marin exceptionnel. Peu de pays ont de tels engins qui descendent aussi profond (jusqu'à 6000 mètres). Certains voudraient l'arrêter. Je crois que c'est une erreur.

Quelle est la place de *Tara* dans ce dispositif?

Bruno David : Il s'agit d'une initiative privée qui arme un bateau beaucoup plus modeste. On ne peut pas comparer l'*Atalante*, qui met en œuvre le *Nautile*, de 85 mètres de longueur, avec une goélette de 20 mètres. Les moyens engagés ne sont pas les mêmes. Ceci étant dit, les résultats scientifiques de *Tara* sont remarquables. Il n'y a pas concurrence, mais complémentarité.

Un de leurs faits d'armes est la découverte d'environ 1,5 million d'espèces lors de leur circumnavigation. On sait que ce sont des espèces différentes, mais on ne les a pas encore décrites. La grande surprise est qu'il y a énormément d'eucaryotes unicellulaires, qui sont certes microscopiques, mais assez complexes, à l'image des paramécies en domaine continental.

Avant, on avait décrit 300000 espèces océaniques. Et *Tara* en dévoile cinq fois plus, de totalement inconnues! Première conclusion, on ne sait absolument pas comment fonctionne l'océan en termes de chaînes alimentaires! *Tara* a révélé notre ignorance.

Au Muséum, vous vous préoccupez également de la biodiversité marine?

Bruno David : Oui. Dans le cadre de *La Planète revisitée*, nous organisons des expéditions importantes qui balaient à la fois la partie continentale et la partie marine de certains endroits de la planète de façon à avoir une vision complète du continuum terre-mer. Nous explorons du sommet d'une montagne jusqu'à 1000 mètres de profondeur et tentons de dresser un inventaire global de la biodiversité.

Cette approche exhaustive, en lien direct avec les missions du Muséum de collection et d'archivage, aide à construire un référentiel, un T_0 d'un système pour un endroit donné particulièrement sensible ou intéressant. L'exploration du nord de la Nouvelle-Calédonie est en cours, celle de la Corse va bientôt démarrer, et il y eut le Mozambique, la Papouasie, la Guyane, et la première, l'île Espiritu Santo du Vanuatu…

Abordons maintenant les menaces qui pèsent sur les océans. L'une d'elles est l'exploitation des ressources minières. Qu'en pensez-vous?

Bruno David : On trouve au fond des océans, en différents endroits, des ressources assez rares comme du palladium, du cadmium, des sulfures… tout ce qui sert à faire des téléphones portables. La tentation est donc grande d'aller les chercher. Ce serait dramatique, particulièrement aux niveaux des monts sous-marins et des sources hydrothermales, parce qu'on détruirait des écosystèmes extrêmement rares, plus diversifiés qu'on ne le pense. Nous devons nous fixer des limites. L'équivalent serait de ravager les oasis du Sahara!

L'exploitation des nodules polymétalliques est moins dramatique. Elle posera bien sûr des problèmes, notamment de turbidité, mais les nodules s'étalant sur de grandes plaines abyssales assez homogènes, par exemple autour de Clipperton, les conséquences de leur prélèvement seraient moins irrémédiables.

Le changement climatique fait également peser plusieurs risques.

Bruno David : L'un d'eux porte sur le régime de courants océaniques et la circulation thermohaline. Les variations de concentration en sel et de température, aidées par la force de Coriolis liée à la rotation de la Terre, mettent en mouvement l'eau. Il en résulte des courants froids comme celui de Humboldt le long de l'Amérique du Sud, des remontées d'eau froide (les *upwellings*) dont profitent les poissons et donc les pêcheries, des courants chauds comme le Gulf Stream qui baigne les côtes européennes et rend le climat tempéré de ce côté-ci de l'Atlantique.

Un grand tapis roulant, ramifié, parcourt ainsi tous les océans : une goutte d'eau met environ 1000 ans à en faire le tour. C'est dire l'inertie du système! Un retour à l'équilibre après une perturbation nécessiterait des siècles. Et l'on n'est pas sûr de retrouver la situation d'avant le bouleversement.

Le système actuel est-il menacé?

Bruno David : Difficile de répondre. On a beaucoup entendu parler de la fonte de la calotte groenlandaise qui apporterait beaucoup d'eau douce dans l'Atlantique Nord et qui pourrait stopper le Gulf Stream, synonyme de refroidissement de l'Europe. Ouoi qu'il en soit dans le détail, nous jouons aux apprentis sorciers sur des systèmes gigantesques à inertie considérable.

Nous jouons aux apprentis sorciers sur des systèmes gigantesques à inertie considérable

La fonte des glaces et le réchauffement climatique (par la dilation des océans) sont également les facteurs essentiels de hausse du niveau marin. Si toute la calotte antarctique fondait, la hausse pourrait atteindre plusieurs dizaines de mètres…

Le réchauffement influe aussi sur l'acidification des organismes?

Bruno David : Effectivement, l'augmentation de la quantité de CO_2 atmosphérique se traduit par celle du CO_2 dissous dans les eaux océaniques. En conséquence, le pH de l'océan est passé de 8,18 à 8,05. C'est assez considérable, car le pH suit une échelle logarithmique. Une telle baisse nuit à un certain nombre d'organismes, notamment ceux ayant besoin à un moment ou un autre de leur existence d'un squelette calcaire.

J'ai étudié par exemple en 2014 l'impact de l'acidification sur les larves d'oursins en Antarctique, en collaboration avec des collègues belges. Les perturbations du métabolisme se traduisent par des changements dans l'allocation des ressources aux différents besoins: respirer, se reproduire… et donc construire un squelette.

L'acidification pose des problèmes de survie à long terme à divers types d'organismes (diatomées, foraminifères…) Précisons néanmoins qu'il y a une importante marge d'erreur, car on ignore tout des capacités d'acclimatation de ces espèces.

Un autre problème, cette fois indépendant du réchauffement, concerne les déplacements de faunes.

Bruno David : On parle ici d'espèces potentiellement invasives, transportées d'un endroit à l'autre par les eaux de ballast des bateaux. L'exemple emblématique est *Asterias amurensis*, une étoile de mer japonaise qui a été «importée» en Australie où elle a retrouvé les conditions tempérées auxquelles elle n'aurait jamais eu accès parce qu'il fallait passer la ceinture tropicale et équatoriale. En quelques années, des millions d'individus se sont développés dans la rade de Melbourne et ont tout détruit, les parcs ostréicoles, mytilicoles…

Les tentatives de les enlever à la main ont échoué. Mary Byrne, une collègue australienne a été sollicitée pour analyser la période de reproduction de cette étoile de mer. L'idée était d'empêcher le transport des larves dans d'autres endroits en interdisant la navigation pendant cette période.

C'est un pis-aller. La bataille est perdue, sauf à espérer une autorégulation sur le long terme, du type de celle qui a sauvé la Méditerranée de l'algue *Caulerpa taxifolia*. Elle est en train de disparaître naturellement, l'arrachage n'y est que pour peu de chose.

Autre danger, la pollution. Que peut-on en dire ?

Bruno David : Jusqu'à présent, elle était plutôt synonyme de marées noires. Gardons d'ailleurs en tête que les tristes expériences en Bretagne de l'*Amoco Cadiz*, du *Torrey Canyon*… ont montré que l'écosystème retrouve son état initial en seulement 10 ans. Bien sûr, le bilan est catastrophique, et nous avons tous en tête les images d'oiseaux mazoutés. Mais l'écosystème est très résilient et est capable de se reconstituer rapidement si on lui en laisse la possibilité. On l'a encore constaté récemment avec la fuite de la plateforme *Deepwater Horizon*, dans le golfe du Mexique, où les bactéries ont dégradé le pétrole à un rythme que l'on attendait plus lent.

Aujourd'hui, la pollution par le plastique est désormais l'objet de toutes les attentions, parce qu'on se rend compte qu'il y en a partout. Les quantités de plastique rejetées en mer sont énormes. Ce matériau s'accumule, se décompose en microparticules et n'épargne aucune zone, des plages jusqu'aux grands fonds. Ainsi, en Écosse, la population de fulmars a diminué de 30 %, car ces oiseaux ingèrent des microbilles de styrène (on parle de «larmes de sirènes») qu'ils prennent pour de la nourriture.

Ces plastiques sont devenus un problème majeur. Leur production devrait ralentir drastiquement, mais on n'en prend pas le chemin, en tout cas à l'échelle mondiale. C'est aberrant que les sacs en papier ne soient pas plus répandus, mais ils font face à une inertie des habitudes. Le plastique devrait être réservé aux usages pour lesquels il n'est pas remplaçable.

Que pensez-vous des mesures prises pour lutter contre ces menaces ?

Bruno David : Prenons le cas de la haute mer. Elle constitue un bien commun de l'humanité et n'appartient à personne. Il y a bien des règles internationales pour l'exploiter, mais aucune n'est contraignante. Or la haute mer est désormais très convoitée pour les ressources que l'on a ailleurs épuisées, comme les poissons, les minerais… Nous aurions besoin de nouveaux traités prévoyant de vraies pénalités et devrions imposer un moratoire complet sur l'exploitation des grands fonds.

Mais commençons par chez nous. Faisons en sorte que le Rhône arrête de déverser des plastiques dans la Méditerranée, même si le Nil continue. Je ne vais pas jeter mon ticket de métro sous prétexte qu'il y en a déjà plein sur le sol !

On peut toutefois remarquer une forme de prise de conscience récente sur la nécessité de réagir. Les réflexions issues de la Conférence intergouvernementale sur la biodiversité marine (BBNJ) à laquelle le Muséum participait vont dans ce sens. Dans ce système de type onusien, avec les contraintes que cela implique, on essaie de définir des modes de régulation à l'échelle mondiale.

L'IPBES (la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), qui a récemment rendu son rapport sur l'état de la biodiversité (elle indique notamment que les humains ont modifié significativement 66 % du milieu marin), fonctionne sur le même modèle. C'est une sorte de Giec de la biodiversité, sachant que celle-ci est autrement plus complexe à appréhender que le climat. La biodiversité globale ne peut être approchée que comme l'agrégation de situations locales. On peut la comparer à un tableau impressionniste, presque pointilliste composé de multiples touches. De près, on ne voit que des petites taches bleues, jaunes, rouges… La vision d'ensemble ne se révèle qu'en prenant du recul.

L'étendue de ce qu'il reste à faire est considérable, tant l'ampleur des dégâts est grande. Je me souviens par exemple d'une expérience marquante avec les océans. C'était en 1999. J'étais en plongée dans le *Nautile* au large d'une partie désertique du Pérou. Quasiment aucune rivière ne se déversait dans le Pacifique à cet endroit. Loin au large, à 2 500 mètres de profondeur, j'étais émerveillé par ce que je voyais, des suintements hydrothermaux froids, un poulpe bleu, des oursins, des amoncellements de crabes rouges… et puis, soudain, un seau en plastique beige avec une corde attachée. Tout est dit. ■

L'écosystème marin est très résilient et est capable de se reconstituer rapidement

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN

Des océans,
nous ne savons rien,
ou presque.

© Dvedog/shutterstock.com

MER ET MERVEILLES

Des coraux vivant en profondeur dans des eaux glacées, des oasis de biodiversité près des eaux chaudes sortant à plus de 400 °C des entrailles de la terre, des organismes microscopiques qui n'ont rien à envier aux monstres de la science-fiction… Nous avons encore tant à découvrir dans les océans ! Des pans entiers, et essentiels, de la vie sous-marine ne sont qu'à peine devinés. Ainsi les virus, d'une si incroyable richesse qu'ils bousculent ce que l'on croyait savoir de la vie elle-même. Et les solutions aux plus grands maux que nous infligeons aux océans sont peut-être en leur sein : les chercheurs découvrent aujourd'hui des bactéries qui dégradent le plastique déversé par millions de tonnes dans les eaux du monde par les activités humaines.

L'ESSENTIEL

- On associe les coraux aux seules mers chaudes des tropiques. C'est un tort.
- On trouve également des récifs coralliens dans les mers tempérées et mêmes froides où ils prolifèrent jusqu'à plusieurs milliers de mètres de profondeur.
- Ils fonctionnent différemment de leurs cousins des mers chaudes: par exemple, ils n'ont pas d'algues symbiotiques qui les nourriraient.
- Par contre, les deux types de coraux sont menacés par le réchauffement climatique.

L'AUTEUR

ANDRÉ FREIWALD
est professeur de paléontologie des invertébrés à l'université d'Erlangen et coordonne le projet *Aces*.

Les coraux venus du froid

Contre toute attente, des coraux s'épanouissent dans les profondeurs des mers continentales jusqu'aux latitudes polaires. Ils n'ont rien à envier en termes d'exubérance à leurs cousins des tropiques.

Des colonies blanches et orangées de *Lophelia pertusa*, avec leurs espèces associées, s'épanouissent dans un récif au large de l'Irlande, à environ 350 mètres de profondeur.

© ifremer | ceCTD cruise 2012

Quiconque a eu la chance de plonger dans les eaux turquoises des Caraïbes n'a pu que s'émerveiller de la luxuriance des récifs coralliens multicolores. Prêt à tenter la même expérience en Norvège par plusieurs centaines de mètres de fond?

Car, on le sait depuis deux décennies: les massifs coralliens ne sont pas l'apanage des zones tropicales, ils sont aussi présents le long des marges océaniques des mers tempérées, en particulier en Atlantique Nord et en Méditerranée. Depuis les canyons au large des côtes italiennes jusqu'au large de la Norvège en passant par le Guilvinec, l'Irlande et l'Islande, plusieurs expéditions ont révélé un spectacle inattendu: de vastes forêts animales sous forme de récifs ou de jardins de coraux abritant un concentré de vie d'une diversité impressionnante. Dans un canyon comme celui du Guilvinec, la densité de crinoïdes (des échinodermes) évoque un champ de tulipes où se nichent mollusques, crabes, étoiles de mer... et où passent poisson sabre, sébaste...

Dès le XVIII^e siècle, Karl Linné avait déjà décrit *Lophelia pertusa*, l'un des coraux d'eau profonde les plus fréquents. Et au XIX^e siècle, les naturalistes avaient découvert que des coraux se développent au large de la Scandinavie, de la Grande-Bretagne et de la péninsule ibérique. Mais on commence seulement aujourd'hui à mesurer leur importance écologique et leur étendue.

De fait, on lit toujours dans les manuels de biologie que les coraux ne se développent que

dans les eaux chaudes, peu profondes et baignées de lumière. Selon certains de ces ouvrages, les massifs coralliens se « nourrissent » des nutriments et du plancton présents dans leur environnement. Or, les eaux tropicales superficielles en sont dépourvues. Rétablissons un peu les faits. Les coraux tropicaux compensent ce manque grâce aux zooxanthelles, des algues photosynthétiques unicellulaires avec lesquelles ils vivent en symbiose. Au contraire, les coraux des eaux profondes n'hébergent pas d'algues, qui, de toute façon, ne survivraient pas dans l'obscurité des profondeurs. Aussi les biologistes ont-ils longtemps tenu ces coraux des profondeurs pour des structures exceptionnelles, éparses et incapables de former de grandes structures coralliennes.

AU NORD, C'ÉTAIENT LES CORAUX

Ils se trompaient. Les recherches récentes ont montré que même dans le Grand Nord, des massifs coralliens profonds se développent aussi vite que leurs homologues tropicaux. D'où les coraux profonds tirent-ils leurs ressources ? Consomment-ils directement zooplancton et crustacés microscopiques ? Comment les régions profondes qui les abritent peuvent-elles être assez riches en nourriture ? Pour répondre, les océanographes ont commencé à répertorier et analyser les coraux des profondeurs et leur environnement. La tâche sera longue, car les marges et les talus continentaux sont à peu près aussi mal connus que les fosses océaniques ! D'ailleurs, l'étendue des massifs qu'ils y ont trouvés, leur diversité et celle des espèces qu'ils accueillent ont surpris.

Aujourd'hui, on réalise que l'extraordinaire dynamisme de ces biotopes particuliers les rend très sensibles aux activités humaines. Alors que les compagnies pétrolières s'intéressent aux gisements profonds, souvent proches des zones coralliennes, la pêche intensive a déjà dévasté de vastes portions de ces dernières. Ainsi, 30 à 50 % des massifs coralliens norvégiens, soit 1 500 à 2 000 kilomètres carrés, auraient déjà été détruits. Les chalutiers modernes attrapent le poisson en raclant le fond, un désastre dans un milieu aussi fragile. Récemment, des mesures de protection partielles, sous la forme de clôtures de zones de pêche, ont été mises en place en Australie, en Irlande, en Norvège… Malheureusement, le suivi de ces aires marines protégées après 5 à 10 ans, notamment en Tasmanie et au large du Royaume Uni, s'il a montré l'efficacité de la protection, a également révélé la faible résilience des récifs coralliens dont la récupération est particulièrement lente dans les zones les plus impactées.

De surcroît, la pollution et des incidents comme celui du *Prestige* coulé près de la barrière de corail de Galice dégradent notablement ces écosystèmes. L'Ifremer a mis en évidence une forte concentration de déchets au fond des canyons, notamment à proximité des ports. En conséquence, l'un des principaux objectifs de l'exploration scientifique des massifs coralliens est de les recenser et de surveiller leur évolution afin de mieux les protéger.

Pour ce faire, l'Union européenne a lancé plusieurs projets scientifiques : *ACES*, de 2000 à 2003, *Coralfish* entre 2008 et 2012, *Hermione*, de 2009 à 2013, *Atlas* jusqu'en 2020… Du sud de l'Europe jusqu'en Islande, l'objectif est de recenser les coraux, d'établir l'histoire et les particularités écologiques de chaque zone, de cartographier les récifs et les jardins, de caractériser les espèces principales et les communautés qu'ils renferment, et enfin, de mesurer l'impact des activités humaines. De là, des recommandations documentées pour l'exploitation durable de ces écosystèmes seront formulées.

De nombreux animaux vivent sur les récifs du corail *Lophelia*, qui se développe dans les eaux profondes de l'océan Atlantique Nord. Ces espèces vivent souvent sur les parties mortes des récifs, telles les anémones *(a et d)* du bassin de Porcupine au large de la Grande-Bretagne, qui ont été photographiées par 700 mètres de profondeur. Des octocoralliaires colorés colonisent aussi ces zones ; ici, *Anthothelia grandiflora* posée sur une éponge jaune *b)*. *Lophelia (c)* est généralement abondant au sommet des récifs.

© IFREMER/caraco © 2001

Si les coraux des zones tempérées sont principalement rencontrés entre 50 et 1000 mètres de profondeurs (pour des températures entre 4 et 10 °C), dans les fjords norvégiens et face à la côte ouest de la Suède, dans le Skagerrak, des coraux se développent parfois à faible profondeur. On en trouve aussi jusqu'à 4000 mètres de profondeur. Des barrières de corail ceindraient donc toutes les marges continentales.

Ces observations ont ouvert un débat sémantique sur l'appellation la plus judicieuse concernant ces coraux tempérés. Initialement nommés « coraux profonds » par opposition aux coraux tropicaux, ils sont le plus souvent rebaptisés « coraux froids » (quoiqu'on les rencontre en Méditerranée là où la température atteint plus de 14 °C), suite à la découverte de récifs beaucoup plus superficiels comme celui situé à seulement 35 mètres de profondeur au large de Tjärno en Suède.

Les zones coralliennes consistent en des structures grouillant de vie, où se concentre une biomasse considérable, séparées par des zones désertes où la faune de grande taille est rare. Ce contraste est confirmé tant par les échantillons prélevés par les stations de mesure immergées que par les photographies prises par les robots et par les sous-marins. Entre les massifs coralliens, c'est à peine si l'on aperçoit de temps en temps une éponge, une holothurie (concombre de mer) ou encore un gros poisson. Cette hétérogénéité de la distribution est relativement commune aux récifs et aux « jardins » de coraux, ainsi qu'aux zones ou les coraux sont distribués verticalement sur les parois verticales qui forment des « falaises » dans les canyons.

L'EXTRAORDINAIRE DYNAMISME DES RÉCIFS CORALLIENS LES REND TRÈS SENSIBLES AUX ACTIVITÉS HUMAINES

PAR MONTS ET PAR COLLINES

Sur les monts, les récifs sont parsemés, comme le récif de Sula, en Norvège qui s'étend entre 250 et 310 mètres de profondeur sur plus de 13 kilomètres de longueur et 400 à 600 mètres de largeur. Il est constitué de dizaines de massifs coralliens allongés et de multiples collines où les massifs sont particulièrement denses et élevés. Les collines s'élèvent en moyenne à 15 mètres au-dessus du fond de la mer et culminent à 35 mètres. Ces récifs sont surtout constitués des deux principales espèces formatrices de récif dans l'Atlantique Nord et en Méditerranée, les coraux *Lophelia pertusa* et *Madrepora occulata*. Quoiqu'on les ait observés systématiquement ensemble du golfe de Gascogne à l'Islande, *Madrepora occulata* est plus fréquent dans les eaux chaudes des canyons de Méditerranée, tandis que *Lophelia pertusa* gagne en importance en remontant vers l'Islande. En Norvège, *Lophelia pertusa* est seul dans nombre de récifs.

Ces deux espèces peuvent montrer des couleurs diverses, de l'orange vif au brun en passant par des tons de rose très soutenus ou du blanc, la couleur dominante dans les récifs nordiques et notamment en Norvège. Les différentes couleurs coexistant dans de nombreuses zones, on s'interroge encore sur leur origine : des facteurs environnementaux ou génétiques, les lignées bactériennes associées à chaque colonie… Au cœur du récif, le corail est arborescent et forme un réseau dense atteignant parfois plusieurs mètres de diamètre, surtout dans les

© JAGO TEAM Seewasser

Les coraux des mers profondes vivent dans un pays de cocagne, où abonde le zooplancton dont ils se nourrissent. Le corail *Lophelia (ci-dessous)* est parfois entouré d'autres espèces de corail, par exemple de *Madrepora (ci-contre)*, comme ici dans le bassin de Rockall par 820 mètres de fond.

hautes latitudes. Plus au Sud, dans le golfe de Gascogne et les canyons de Méditerranée ou les monts sous-marins entre Gibraltar et les Açores, les colonies, plus modestes, atteignent rarement plus de 30 à 50 centimètres.

LE VER ASSOCIÉ

Les deux espèces coralliennes sont associées en permanence avec *Eunice norvegica*, un ver polychète prédateur, de 25 centimètres de longueur, vivant à l'intérieur des colonies où il construit lui-même des tubes, ce qui renforcerait la structure générale. En contrepartie, le ver profite d'un apport de nourriture facilité. Cette symbiose est essentielle à la stabilité du massif. Des sébastes sont souvent observés, statiques, à côté d'une colonie au pied de laquelle ces poissons semblent parfois monter la garde. Lorsque l'on s'éloigne des récifs, on trouve de nouveaux habitants comme de grandes éponges, des crustacés ou des coraux qui ne forment pas de récifs, mais dont la forte densité crée parfois des «jardins» dont la structure offre des fonctions similaires à celles des récifs: coraux noirs, gorgonaires, hydraires, «plumes de mer»...

Sur le récif de Sula que nous avons étudié en détail, la vie s'organise en cinq «zones de vie» caractérisées par des faunes différentes. La première est l'imposante couche qui recouvre sur environ 1,5 mètre d'épaisseur le sommet et la partie supérieure des flancs des collines. Cette zone est surtout colonisée par *Lophelia pertusa* et, de façon marginale, par deux autres espèces de corail. Généralement blanc, *Lophelia pertusa* constitue l'essentiel de la structure du massif. Cette première zone n'abrite que quelques éponges et quelques coquillages, car *Lophelia pertusa*, pour éviter d'être colonisé par d'autres espèces coralliennes ou par des prédateurs de coraux, fabrique un mucus. À part certains bivalves, quelques gastéropodes et quelques octocoralliaires (des coraux à huit tentacules) colorés, les prédateurs potentiels sont «calcifiés» par le mucus. Les éponges et les autres organismes qui absorbent le calcaire structurent également le massif corallien, y créant crevasses et autres niches de vie.

LES DEUX ESPÈCES CORALLIENNES SONT ASSOCIÉES EN PERMANENCE AVEC *EUNICE NORVEGICA*, UN VER POLYCHÈTE PRÉDATEUR

La variété des espèces est maximale dans la deuxième zone de vie, épaisse de plusieurs mètres. Cette zone est constituée des squelettes calcaires des polypiers morts; elle offre d'innombrables cavités. *Lophelia pertusa* colonise également cette zone, mais elle «pousse» mal sur les parois souvent verticales. En revanche, les invertébrés y prolifèrent: des anémones de mer aux vives couleurs, des bivalves et des gastéropodes, des seiches et quelques espèces de coraux qui ne forment pas de colonies. Sur les surplombs, de grands bivalves du genre *Acesta* se nourrissent de plancton. Les crustacés, étoiles de mer et autres oursins, qui se déplacent, jouent aussi un rôle important dans cet écosystème. Par endroits, on note la présence de *Lophelia pertusa* vivant.

Plus bas, dans la troisième zone de vie, de la vase, du sable et des restes de squelettes animaux se sont déposés dans la charpente du massif. Dans cette zone, vieille de plusieurs milliers d'années, des murs verticaux se dressent parfois sur 15 mètres de hauteur.

© IFREMER/caracole 2001 © André Freiwald IFREMER/caracole 2001

Les grandes éponges et les octocoralliaires, parsemés de quelques petits coraux branchus, dominent le paysage.

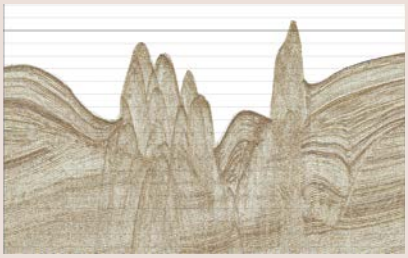
Située sur la pente douce des derniers mètres du massif, la quatrième zone de vie est un éboulis de débris coralliens. On y rencontre les grands crustacés et les échiuriens, des vers pourvus d'une longue trompe contractile. Enfin, la partie inférieure de cet éboulis, cinquième zone de vie, est surtout colonisée par les éponges.

Au large de l'Irlande, les coraux du bassin de Porcupine sont différents. On y trouve les mêmes espèces coralliennes que sur la crête de Sula, mais elles vivent entre 600 et 900 mètres de profondeur sur les bords d'une dépression proche du talus continental. Dans les années 1990, les océanographes ont découvert ces immenses massifs de coraux qu'ils se concentrent sur de curieux monticules, nommés monts carbonatés et révélés par l'équipe de Jean-Pierre Heniet, de l'université de Gand, dans le cadre du projet européen *Geomound*. Certains monts sont noyés sous les sédiments, d'autres en émergent nettement.

Le bassin de Porcupine comprend trois zones de monts d'apparences variées, sur lesquels poussent les coraux. Les monts de Magellan, les plus au nord, sont recouverts de sédiments, à l'exception de quelques collines qui dépassent. Certains atteignent 90 mètres de hauteur. Par rapport aux deux autres régions coralliennes du bassin de Porcupine, les monts de Magellan se distinguent par leur taille et par leurs formes variées. Un peu plus au sud se dressent les monts Hovland, larges de 1 à 5 kilomètres et hauts de 150 mètres. En outre, leurs fondements sont enfouis sous les sédiments, probablement sur une centaine de mètres. Ces monts sont très riches en coraux branchus. Enfin, la troisième région corallienne du bassin de Porcupine se trouve à bonne distance vers le sud-est, sur le talus continental irlandais. Ces monts, nommés Belgica, parfois isolés, parfois groupés, forment des cônes de 150 mètres de hauteur, flanqués de structures allongées souvent ensevelies dans les sédiments de la marge continentale; leurs parois escarpées du côté de la fosse océanique sont recouvertes de coraux.

DES COURANTS VITAUX

Durant l'été 2001, lors de la campagne *Caracole*, Karine Olu, de l'Ifremer, à Brest, a cartographié plusieurs monts du bassin de Porcupine et du bassin de Rockall, situé plus au Nord. Grâce au robot sous-marin *Victor* embarqué sur l'*Atalante*, l'équipe a cartographié des massifs coralliens à un mètre près, enregistré la vie du fond en vidéo et prélevé des échantillons. L'écosystème se distingue de plusieurs façons de celui des coraux norvégiens. Les coraux forment ici des massifs moins imposants, mais beaucoup plus étendus. Ils comprennent une plus grande diversité de coraux constructeurs. En outre, *Aphrocallistes*, une éponge étonnante en forme d'entonnoir,



Le robot sous-marin téléguidé *Victor (en haut)* de l'Ifremer, a exploré les coraux d'eau profonde des bancs de Porcupine et de Rockall. Ce mont *(ci-dessus)*, dans le bassin de Porcupine, aurait deux millions d'années. Ce profil a été obtenu par des mesures sismiques

DES CORAUX EN SYNERGIE

Lors du projet européen *Coralfish*, initié en 2012, plusieurs expéditions Ifremer ont exploré des récifs de coraux d'eau froide dans le golfe de Gascogne, en mer Celtique et en mer d'Islande. Elles ont révélé la présence systématique et l'importance de l'espèce *Madrepora oculata* aux côtés de *Lophelia pertusa* que l'on croyait très majoritaire. En fait, les deux espèces forment des récifs mixtes le long de la plupart des côtes européennes. La structure complexe mise au jour à la base de ces récifs indique, au moins dans l'Atlantique, la succession de cycles d'extinction et de recolonisation au gré des périodes chaudes et froides des périodes glaciaires. La distribution de ces coraux serait-elle donc dépendante des changements climatiques ? Pour vérifier cette hypothèse, des analyses génétiques, initiées dans ce premier projet, ont été finalisées dans le cadre du projet européen *Atlas* (2016-2020): il s'est agi d'étudier la distribution et la diversité génétique actuelles de ces deux espèces coralliennes depuis la Méditerranée jusqu'à l'Islande. Étonnamment, ces deux espèces cosmopolites n'ont pas le même profil de distribution. Ainsi, la recolonisation postglaciaire de l'un (*Lophelia pertusa*) semble avoir été soutenue par une dispersion larvaire importante véhiculée par les masses d'eaux et les courants principaux depuis une source proche de la Méditerranée, tandis qu'un scénario beaucoup plus complexe s'impose pour la seconde (*Madrepora oculata*). Les résultats confirment ainsi l'influence des changements climatiques passés sur ces deux espèces majeures constructrices de récifs dans nos zones tempérées. Ils soulignent également la nécessité de dissocier les processus de dispersion contemporains de l'histoire évolutive des espèces, afin de mieux comprendre et prédire l'influence des changements environnementaux passés et futurs sur la distribution des récifs, leur dynamique et leur connectivité.

SOPHIE ARNAUD-HAOND, IFREMER

© André Freiwald, IFREMER/caracole 2001

contribue de façon notable à la formation de la structure. On remarque aussi de nombreux échinodermes (oursins, étoiles de mer, crinoïdes…) et autres anémones bigarrées.

Malgré ces différences, les deux massifs coralliens se ressemblent par la force des courants, dont la vitesse atteint, par endroits, 40 centimètres par seconde. Des vitesses comparables se rencontrent dans d'autres massifs coralliens. Ces courants y sont-ils indispensables à la vie? Nous sommes plusieurs à le penser. La croissance des coraux est continue, ce qui nécessite d'importants apports de plancton que seul un courant fort peut apporter. Ainsi, au printemps, pendant et après l'efflorescence du plancton, on observe une forte croissance du corail.

TENTACULES ET CRUSTACÉS

En 1997, à Sula, grâce à une caméra spéciale, nous avons observé, à deux centimètres de distance, comment les polypes attrapent de petits crustacés avec leurs tentacules, puis les ingèrent. Depuis, nous avons identifié toute une série de petits animalcules susceptibles d'être consommés par le corail.

Dans chacun des massifs étudiés, nous avons constaté que les coraux vivent dans un intervalle de profondeur réduit. Ainsi, tandis que certains bancs norvégiens commencent vers 100 mètres de profondeur, ils s'étendent jusqu'à 200 voire 300 mètres. Au large de l'Écosse et de l'Irlande, les coraux apparaissent vers 500 ou 600 mètres et se développent jusqu'à 1000 mètres de profondeur. On connaît même des massifs plus profonds. Apparemment, les colonies de polypiers ne se forment que si certaines conditions sont réunies. Pour les connaître, nous avons comparé la température, la salinité et la concentration en oxygène des eaux environnantes. Les coraux profonds ont besoin d'une température de 4 à 12 °C et d'une salinité élevée. Les eaux salines contiennent en effet beaucoup de calcaire dissous, que les coraux utilisent pour construire leur squelette. En outre, ils se développent dans les zones de fort courant, où se forment aussi des ondes de marée (créées par des phénomènes de résonance à proximité des talus continentaux escarpés) qui concentrent les nutriments et le plancton.

Quand l'histoire de ces coraux profonds a-t-elle commencé? Ils existent au moins depuis 240 millions d'années. Découverts dans la péninsule antarctique, les *Lophelia* fossiles les plus anciens datent d'environ 50 millions d'années. Des fossiles provenant du bassin de Porcupine dateraient d'environ 350000 ans. Leur origine à cette époque pourrait s'expliquer par la fermeture de l'isthme de Panama conduisant à l'apparition du Gulf Stream. Sur la crête de Sula, les premières larves de coraux semblent s'être fixées dans les sillons laissés par le retrait des glaciers à la fin de la dernière

Des crinoïdes vivent à quelque 800 mètres de profondeur sur l'un des tertres coralliens du bassin de Rockall.

glaciation. Les estimations de la vitesse de croissance et la datation radio-isotopique montrent que des bancs de coraux s'y formèrent il y a 8000 ans, soit 4000 ans après le retrait des derniers glaciers. Des icebergs géants auraient creusé des sillons d'une centaine de mètres de largeur et d'une dizaine de mètres de profondeur. Les traces de ces sillons creusés par la « charrue glaciaire » sont visibles sur les enregistrements sonar.

Les icebergs convoyaient aussi de gros rochers qui se déposèrent sur le fond après la fonte, constituant autant de surfaces d'ancrage pour les coraux. Le massif de Sula, dont on connaît bien l'histoire, a servi de modèle de formation de massifs coralliens dans les mers profondes. Les monts du bassin de Porcupine ont une origine encore plus reculée. Les glaciers qui, à plusieurs reprises, se sont avancés au large des îles Britanniques ne les ont jamais atteints. D'après les mesures sismiques, les premières formations coralières auraient entre 1,8 et 2,2 millions d'années.

NOURRIS AU PÉTROLE

Quelles ont été les ressources de ces coraux, au tout début? On sait que les hydrocarbures, qui suintent des sources sous-marines de pétrole, et les nutriments libérés par les sources hydrothermales entretiennent des communautés florissantes, les unes sur les marges continentales, les autres le long des dorsales océaniques. Au sein de tels écosystèmes, les hydrocarbures, le méthane et les sulfures sont consommés par les micro-organismes et constituent la base de la chaîne alimentaire. Dans la région de Sula, du méthane sort du fond. Il est possible que certains coraux profonds bâtisseurs de récifs fassent toujours partie de telles chaînes alimentaires.

© André Freiwald

Toutefois, les connaissances acquises sur l'habitat des coraux, toujours situé dans des zones à forts courants qui non seulement évite l'ensevelissement sous les apports sédimentaires, mais permet également un apport massif en particules ont conduit à penser que les coraux profonds tirent l'essentiel de leur nourriture du plancton de surface qui sédimente. Quelques études isotopiques favorisent aussi l'hypothèse d'un apport nutritionnel reposant principalement sur les apports de particules depuis la surface, davantage que celle de la chimiosynthèse.

COURANTS ALTERNATIFS

L'analyse de carottes sédimentaires a montré que des phases de croissance corallienne intense ont alterné avec des périodes d'apport sédimentaire, ce qui produit des strates alternées. Ces phases sont liées à l'état des courants pendant les périodes correspondantes : lorsqu'ils étaient intenses, peu de sédiments se sont déposés et la croissance corallienne a été importante. Lors des périodes plus calmes, les sédiments s'accumulèrent, ensevelissant les coraux et les détruisant. D'après les premières datations, les phases riches en coraux se situent dans les périodes chaudes, et les phases de sédimentation pendant les glaciations. Ces couches alternées représentent une nouvelle forme d'archives climatiques. Elles montrent que jamais les coraux profonds n'ont été asséchés, même pendant les périodes les plus froides (dites « périodes glaciaires »), quand le niveau de la mer était inférieur de 120 mètres à son niveau actuel, comme c'était le cas il y a plus de 12 000 ans.

Ainsi, l'observation des récifs du nord de l'Atlantique avait conduit les chercheurs à l'hypothèse d'une stase durant la dernière période glaciaire suivie d'une recolonisation. Ils avaient observé que les profondeurs de prédilection des coraux dans ces zones du nord de l'Atlantique coïncidaient avec celle de la « veine d'eau méditerranéenne ».

Ce courant, comme son nom l'indique originaire de Méditerranée, longe le golfe de Cadiz puis le golfe de Gascogne jusqu'à rejoindre les hautes latitudes. Son accélération à la fin de la dernière période glaciaire pourrait effectivement coïncider avec la période de recolonisation des récifs coralliens par des populations refuges issues de latitudes moins élevée. L'analyse de la diversité génétique des coraux de Méditerranée et de l'Atlantique, conduite à Ifremer, a récemment corroboré cette hypothèse (*voir l'encadré page 19*).

Ainsi, les coraux des mers froides n'ont rien à envier à leurs cousins des tropiques en termes de richesse, de surprises et d'exubérance. Alors, à vos équipements de plongée ! ■

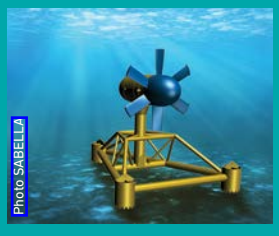
BIBLIOGRAPHIE

J. BOAVIDA *ET AL.*, Out of the Mediterranean? Post-glacial colonization pathways varied among cold-water coral species, *Journal of Biogeography*, vol. 46(5), pp. 915-931, 2019.

L. MENOT *ET AL.*, The ecological role of patchy cold-water coral habitats: does coral density influence local biodiversity in submarine canyons of the bay of Biscay? DSBS 2018, Monterey (Californie).

ENSTA Bretagne

Connaissance des océans
Développement maritime durable



Énergies marines renouvelables

Navires du futur
Drônes marins

Océanographie
Hydrographie (cat. A)

Management de projets maritimes

- Formations d'ingénieurs, masters, mastères spécialisés, doctorat
- Programmes de recherche nationaux et internationaux
- Innovation maritime, création d'entreprise
- Formation tout au long de la vie

www.ensta-bretagne.fr

École d'ingénieurs et centre de recherche pluridisciplinaire à Brest

L'ESSENTIEL

- Les sources hydrothermales résultent d'infiltrations à travers les fractures de la roche d'eau de mer, qui se réchauffe et se transforme en profondeur avant de remonter.
- Lors de son passage dans la roche, l'eau dissout divers éléments, par exemple des métaux, et s'enrichit en composés porteurs d'énergie, tel le sulfure d'hydrogène.
- Des bactéries qui utilisent ces composés forment le premier maillon d'écosystèmes foisonnants autour des sources hydrothermales.

L'AUTEURE

NADINE LE BRIS
travaille au laboratoire d'Écogéochimie des environnements benthiques (UPMC-CNRS) de l'université Pierre-et-Marie-Curie et du CNRS, à Banyuls-sur-Mer.

Des roses tapies au fond des mers

Les sites hydrothermaux, dont le premier fut nommé « Jardin de roses » tant la vie qui s'y déployait surprit, sont des havres pour une multitude d'organismes. Ces habitants des profondeurs prospèrent grâce à une chimie du vivant inédite.

© Universal History Archive / Getty Images

Un fumeur noir, au large des îles Galápagos, dans le Pacifique. Contre toute attente la vie y abonde.

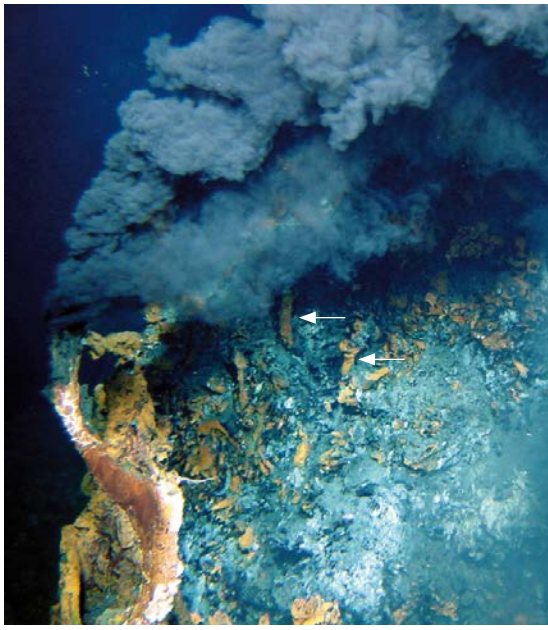
Jardin de roses (*Rose Garden*), c'est ainsi qu'on a nommé la première source hydrothermale découverte. C'était en 1977, à 2500 mètres de profondeur, au large des îles Galápagos, sur la dorsale Est-Pacifique, où la remontée du magma engendre la croûte océanique. Ces sources d'eau réchauffée dans les entrailles terrestres confirmaient que la lithosphère et l'océan échangent de la chaleur. Cette observation constituait le but de l'expédition, mais celle-ci a tout de même réservé une surprise de taille : les sources hébergeaient une vie foisonnante (bivalves, crustacés, vers…), dont le gigantisme, pour certains, et l'abondance étaient totalement inattendus dans les abysses. Le nom traduit cette effervescence.

On ne s'attendait pas à trouver de la vie dans cet environnement extrême, et trop éloigné de la surface de l'océan pour autoriser la photosynthèse ; les organismes utilisent d'ailleurs une autre source d'énergie, d'origine chimique.

En 1977, on n'a observé que des sources de fluide tiède, nommées sources diffuses, dont la température n'excède pas 30 °C, et qui s'échappent de crevasses entre des lobes de lave refroidie ; avant de sortir, les fluides chauds y sont dilués par l'eau de mer froide (2 °C) qui circule dans le réseau de fractures du basalte. Deux ans plus tard, en 1979, on découvrait les fumeurs noirs, des « cheminées » dont le conduit central laisse échapper des fluides hydrothermaux à plus de 300 °C (*voir ci-contre*). Là encore, la vie foisonnait, que ce soit à l'intérieur des parois poreuses des cheminées ou sur leurs flancs. L'énergie utilisée par ces communautés est aussi d'origine chimique et elle abonde dans les fumeurs noirs.

Cependant, il ne suffit pas que l'énergie soit disponible, encore faut-il pouvoir l'exploiter, parfois dans des conditions de température et de toxicité particulièrement stressantes. Pour tirer profit d'un environnement aussi réactif et instable, quelles stratégies adoptent ces espèces ?

Les sources hydrothermales ressemblent à des réacteurs chimiques où se rencontrent du fluide hydrothermal et de l'eau de mer, deux liquides dont les compositions sont notablement différentes. Les organismes tirent profit des déséquilibres qui en résultent. Le fluide >



d'hydrogène (H_2S ou HS^-), absent dans l'eau de mer où le soufre est présent uniquement sous sa forme la plus oxydée, le sulfate (SO_4^{2-}). L'eau de mer contient en effet de nombreux composés, comme l'oxygène et le nitrate (NO_3^-), capables d'échanger des électrons avec le sulfure, qui se transforme alors en sulfate.

Cette dernière réaction est favorisée lorsque le sulfure du fluide hydrothermal jaillit du sol et entre en contact avec l'eau de mer. Elle libère une quantité importante d'énergie, que les microorganismes exploitent. Certaines bactéries, dites sulfo-oxydantes, catalysent cette réaction, détournant à leur profit les électrons échangés et l'énergie libérée pour synthétiser des molécules d'ATP (adénosine triphosphate), vectrices de l'énergie au sein des cellules. Grâce à cette énergie, d'autres microorganismes, dits chimio-autotrophes, fabriquent des biomolécules à partir des composés inorganiques dissous dans l'eau de mer, comme le dioxyde de carbone (CO_2). Ils fournissent ainsi une ressource abondante à tout l'écosystème.

Comment expliquer la composition des fluides hydrothermaux? Ceux-ci sont issus d'une transformation progressive de l'eau de mer (riche en sulfates), qui s'infiltre dans les fractures de la croûte océanique et réagit au contact des roches à haute température et forte pression – dans ces conditions, les sulfates captent des protons H^+ de leur environnement et arrachent des électrons aux métaux des roches pour former des sulfures –, avant de remonter vers la surface. En parallèle, le fluide s'acidifie et s'enrichit en composés volatils issus du magma, comme le CO_2 et parfois le dioxyde de soufre. De nombreux éléments incorporés dans les roches de la croûte océanique sont dissous par le fluide acide. Celui-ci emporte ainsi du silicium et de multiples métaux (fer, manganèse, zinc, cuivre et, en quantités moindres, cadmium, plomb, mercure, arsenic, or et argent), dans des proportions variables selon son degré d'acidité et la nature des roches. La composition des fluides hydrothermaux varie donc d'une source à une autre.

À l'instar du sulfure, nombre de métaux des fluides réagissent avec les composés oxydants de l'eau de mer, offrant aux communautés microbiennes une grande diversité de sources d'énergie, dès lors qu'elles sont capables de concurrencer les réactions chimiques spontanées. Des écosystèmes variés se mettent alors en place autour des sources. Des colonies de microbes et d'animaux marins s'y distribuent, selon leur tolérance aux températures élevées et leur capacité à exploiter les ressources disponibles. Ainsi, entre les fluides brûlants des fumeurs noirs et ceux plus tièdes des sources diffuses se décline toute une gamme d'habitats et de communautés.

Le ver *Alvinella Pompejana (ci-dessus)* survit sur les flancs des fumeurs noirs, au plus près des émanations, en construisant des tubes protecteurs *(à droite, indiqués par des flèches)*. Au sein du tube règne un microenvironnement interne moins hostile. Des bactéries sulfo-oxydantes *(les filaments blancs sur la photographie du médaillon)* y prospèrent sur le dos d'*Alvinella pompejana*. Les vers *Riftia Pachyptila* (les tubes rouges et blancs) atteignant deux mètres de longueur colonisent quant à eux les sources diffuses *(page ci-contre)*. Ils vivent en symbiose avec des bactéries sulfo-oxydantes.

L'ENFER DES FUMEURS NOIRS

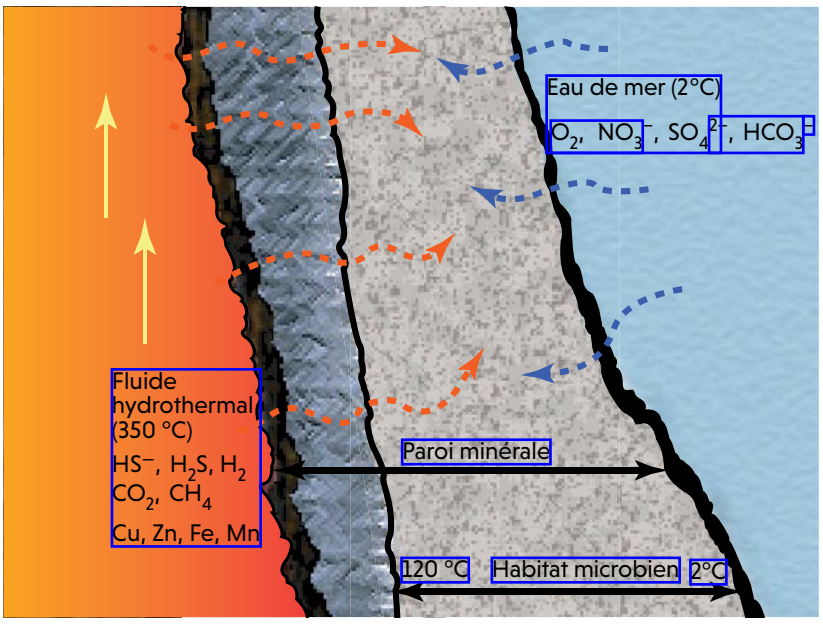
Aucun organisme ne tolère le contact direct avec les fluides des fumeurs noirs, dont la température atteint 410 °C. Cependant, leur voisinage est un peu moins hostile, grâce aux métaux dissous transportés par le fluide: ceux-ci se solidifient au contact de l'eau de mer froide, isolant le fluide chaud par une paroi minérale. Les sulfures de cuivre, de fer et de zinc constituent ainsi des conduits de cheminée. Le fluide chaud qui s'en échappe au sommet forme un panache sombre chargé de particules de ces mêmes sulfures métalliques. La fraction la plus fine, composée de nanoparticules, serait transportée sur de grandes distances. Plus encore, Joseph Resing, de l'université de Washington, et ses collègues, ont récemment montré que le fer, mais aussi le manganèse et l'aluminium,

© S. Beaulieu, K. Joyce, and S.A. Soule, WHOI, 2010; Funding from InterRidge and Morss Colloquium Program at WHOI; Ifremer/MESCAL

sont transportés sous forme dissoute sur de longues distances et profitent donc à des organismes plus éloignés.

Les cheminées hydrothermales atteignent 10 à 20 mètres de hauteur et plusieurs mètres de diamètre. Dans ces assemblages de conduits et de roches poreuses qui séparent l'eau de mer et le fluide, la température et les conditions chimiques varient fortement. Dépassant le plus souvent 300 °C au contact du fluide, la température de la roche n'est plus que de quelques degrés ou dizaines de degrés du côté opposé.

C'est à l'intérieur des parois de ces cheminées qu'ont été découverts les organismes les plus



Les parois minérales des fumeurs noirs sont poreuses, de sorte que les espèces chimiques des fluides hydrothermaux et de l'eau de mer diffusent à l'intérieur *(flèches pointillées orange et bleues)*. Elles alimentent une riche vie microbienne, capable de survivre jusqu'à 120 °C.

© Takuji JANSTEC

résistants aux fortes températures. Le record est détenu par l'archébactérie *Pyrolobus fumarii*, isolée dans une cheminée sur la dorsale Atlantique: elle supporte une température d'environ 120 °C. Au-delà, aucun organisme ne semble résister, de sorte que la zone de la cheminée la plus proche du fluide est dépourvue de vie (*voir la figure ci-dessous*). À partir de ce seuil de température, et jusqu'à la face externe, la paroi minérale abrite une succession de communautés microbiennes réparties selon leur tolérance thermique et de leurs besoins énergétiques.

UN HÉRITAGE LOINTAIN

La diffusion de molécules dans les parois poreuses conditionne les sources d'énergie disponibles. La plupart des composés oxydants, tels l'oxygène, les nitrates et les sulfates, proviennent de l'eau de mer; depuis l'extérieur, ils migrent au travers de la paroi où ils sont progressivement consommés. Aux plus hautes températures, vers l'intérieur de la cheminée, seul reste du CO_2 apporté par le fluide. Les archées hyperthermophiles dites méthanogènes le convertissent en méthane (CH_4) en utilisant de l'hydrogène; ce sont les seuls organismes à ne dépendre que du fluide hydrothermal. Leur métabolisme pourrait être hérité des plus anciennes formes de vie, apparues lorsque les océans étaient dépourvus d'oxygène. Certains voient même dans les conditions régnant près des sources hydrothermales, celles qui ont favorisé la naissance de la vie.

Le gradient de température à l'intérieur des parois minérales est relativement stable. À l'inverse, la région du mélange entre le fluide et l'eau de mer est une zone turbulente, où les conditions chimiques et la température fluctuent. La proximité immédiate de ces panaches, bien que riche en énergie, constitue donc un environnement *a priori* défavorable à la vie.

Quelques organismes réussissent tout de même à prospérer au plus près des sorties de fluides de haute température. C'est le cas d'*Alvinella pompejana*, un ver annélide qui s'installe sur les flancs des fumeurs, où il construit un tube dans lequel il s'abrite (*voir la figure page ci-contre*). Celui-ci, constitué de protéines exceptionnellement résistantes, le protège.

Grâce à des électrodes miniatures, on a montré que le milieu interne du tube comprend surtout de l'eau de mer. L'hypothèse la plus probable est que l'hôte le ventile (par des ondulations de son corps et en rentrant et sortant rapidement la partie supérieure de celui-ci) pour y maintenir une température tolérable. Ce faisant, il favorise le développement de bactéries sulfo-oxydantes, dont les filaments couvrent son dos.

Alvinella pompejana est donc armé pour l'environnement extrême des parois des fumeurs noirs, où les quantités élevées de sulfure d'hydrogène, de CO_2 et de métaux toxiques (cuivre, cadmium, >

plomb…) ainsi que les radicaux libres (des molécules très instables et très réactives) formés lors de l'oxydation du fer et du sulfure accompagnent d'importantes fluctuations de température. La croissance rapide de son tube, indispensable protection contre ces fluides agressifs, contrebalance l'épaississement des parois de la cheminée, qui emprisonne progressivement la base du tube.

UNE ESPÈCE INGÉNIEUR

Cette pionnière est aussi une espèce «ingénieur»: ses colonies denses forment peu à peu une sorte de «revêtement isolant» sur les parois des fumeurs noirs. Les conditions beaucoup plus stables et moins toxiques qui en résultent autoriseraient l'installation d'autres espèces animales sur ces parois.

Hors des zones les plus chaudes, privilégiées par *Alvinella pompejana*, s'échappent parfois des fluides dilués par l'eau de mer lors de leur passage au travers du réseau de fissures et de roches poreuses, et qui ont des températures plus compatibles avec la vie. Parfois situées à la base ou sur les flancs des cheminées, ces émissions de basse température se rencontrent aussi sur le plancher de laves basaltiques (ce sont les sources diffuses déjà évoquées). Bien que très dilués, ces fluides restent enrichis en sulfure et favorisent le développement d'assemblages denses et prolifiques d'invertébrés et de bactéries chimio-autotrophes.

On peut comparer l'environnement fluctuant des sources diffuses à celui de la zone intertidale (la partie du littoral alternativement dévoilée et recouverte par la marée). Cette comparaison est d'autant plus pertinente que la marée influe aussi sur les caractéristiques de l'environnement hydrothermal, à plus de 2000 mètres sous la surface. En effet, elle crée des courants de fond, auxquels se superposent les turbulences du mélange entre l'eau de mer et le fluide, de sorte qu'en un point donné, la température peut varier de plusieurs degrés en quelques heures, voire minutes. Ces fluctuations de la température s'accompagnent d'une alternance entre phases riches en oxygène et phases riches en sulfure, due aux variations des courants. Cet environnement est favorable aux symbioses chimiosynthétiques, où les partenaires profitent mutuellement de leurs capacités à utiliser les ressources disponibles.

Comme tous les animaux multicellulaires, les espèces endémiques des sources hydrothermales maintiennent constants leurs paramètres physicochimiques en dépit des variations du milieu externe. En outre, certains invertébrés hydrothermaux absorbent l'oxygène et le sulfure de leur environnement, qu'ils concentrent en les fixant sur leur hémoglobine pour les transporter vers différents organes; ils font alors bénéficier leurs bactéries symbiotes

Le site de *Lost City (la cité perdue)* sur la dorsale Atlantique doit son nom à la quasi-absence d'animaux chimiosynthétiques qui prospèrent sur les autres sources hydrothermales. Les fluides sont pourtant aussi riches en hydrogène, en méthane et, dans une moindre mesure, en sulfures, mais ils se distinguent par leur pH : 10 à *Lost City* contre 2 à 6 ailleurs. En conséquence, ils ne dissolvent pas les métaux lors de leur passage dans les roches du plancher océanique. Les fumeurs noirs sont alors remplacés par des édifices blancs de carbonates de calcium et de magnésium.

d'un milieu particulièrement riche en ces deux éléments. Ainsi le ver *Riftia pachyptila*, comme les autres espèces du genre sibloglinidé, abrite des populations de bactéries sulfo-oxydantes dans son trophosome, un organe interne situé dans la partie blanche de son «tube». En retour, l'animal en dépend totalement: elles transforment le sulfure d'hydrogène et le dioxyde de carbone en composés essentiels.

L'efficacité de ces symbioses est révélée par les taux de croissance exceptionnels des individus – presque un mètre par an – et de leurs populations. La concentration intracorporelle en sulfure du fluide interne de *Riftia pachyptila* peut atteindre plusieurs dizaines de milligrammes par litre, bien au-delà de sa teneur maximale dans l'environnement et des seuils de tolérance de la plupart des animaux; il y résiste notamment en «sélectionnant» ses formes les moins toxiques et en fixant le sulfure sur son hémoglobine pour le transporter jusqu'aux bactéries. Sa capacité à fixer le sulfure et l'oxygène explique vraisemblablement son taux de croissance record.

L'assimilation du sulfure dépend cependant de sa forme chimique dans l'environnement immédiat de la branchie de l'animal. Seul le sulfure d'hydrogène passe la membrane branchiale. Or cette propriété peut être «neutralisée» par le fer du fluide, qui a une forte affinité pour le sulfure, avec lequel il s'associe pour former des complexes bloqués par la membrane. En outre, le fer accélère l'oxydation spontanée du sulfure, le rendant inexploitable pour les organismes vivants.

Se pose aussi le problème de la toxicité. Des deux formes acide et basique du sulfure d'hydrogène (H_2S et HS^-), H_2S est la plus toxique du fait de sa capacité à diffuser au travers des membranes biologiques et à inhiber le fonctionnement cellulaire. HS^- prédomine dans l'eau de mer faiblement alcaline, mais l'acidité

© Ifremer/EXOMAR

du fluide hydrothermal, même en petite quantité, augmente notablement la proportion de sulfure toxique H_2S aux alentours des sources. Certaines espèces, tel *Riftia pachyptila*, semblent éviter par des adaptations biochimiques la diffusion d'H_2S à l'intérieur de leur branchie, alors que la forme moins toxique HS^- est assimilée. D'autres organismes, tels les bivalves du genre *Bathymodiolus*, sont protégés par des bactéries symbiotes qui consomment le sulfure directement dans leur branchie.

En plus d'être extrêmes, les environnements hydrothermaux sont soumis à de violentes perturbations naturelles. Les plus spectaculaires sont les éruptions volcaniques majeures, qui couvrent de lave un grand nombre de sites et suppriment toute trace de vie. Après ces épisodes, la vie se réinstalle vite autour des sources, selon une séquence de recolonisation qui dure quelques années.

POMPÉI SOUS LES MERS

Les tapis microbiens réapparaissent en premier. En moins d'un an, ils sont rejoints par des espèces pionnières telle *Tevnia jerichonana*, un ver apparenté à *Riftia pachyptila*. La suite est plus variable : ces espèces prospèrent ou laissent la place à d'autres qui deviennent à leur tour dominantes, mais les populations déclinent parfois et s'éteignent. La recolonisation s'accompagne de changements rapides dans la composition des fluides, et donc dans les formes d'énergie disponibles, ainsi que dans les contraintes de température et de toxicité. Le rôle de ces changements sur les successions observées reste l'une des grandes questions actuelles ; en particulier, les conditions qui favorisent une espèce symbiotique plutôt qu'une autre sont débattues, faute de bien connaître les besoins physiologiques des différentes espèces et de leurs bactéries symbiotes.

Des événements moins violents que les éruptions volcaniques conduisent aussi à l'extinction locale des populations. Ainsi, un phénomène de séparation de phase se produit parfois à plusieurs centaines de mètres sous le plancher océanique : une fraction du fluide, concentrée en éléments lourds (sels, métaux…), se condense sous forme de saumure, tandis qu'une fraction plus légère, enrichie en composés volatils (sulfure d'hydrogène, hydrogène, méthane…), remonte à la surface. La composition des fluides hydrothermaux change alors au cours du temps, les éléments les plus volatils étant émis en premier et les plus lourds ensuite. Lorsque la fraction légère riche en sulfure s'épuise, les espèces symbiotiques, dont c'est la ressource principale, disparaissent.

Nous l'avons vu, la composition des fluides dépend des roches à travers lesquelles ils passent. Or dans certains cas, ces roches sont

Les sites hydrothermaux recèlent des réserves potentielles d'hydrogène

celles du manteau terrestre : situées sous la croûte, elles sont le plus souvent loin de la surface et inaccessibles aux fluides, mais parfois, déplacées par des forces tectoniques, elles s'en rapprochent, allant jusqu'à affleurer sur les fonds marins. Très réactives, les roches du manteau s'altèrent au contact de l'eau. Ce phénomène, nommé serpentinisation, produit de l'hydrogène en grande quantité, qui réagit lui-même spontanément à haute température et haute pression avec le CO_2 pour former du méthane. Ces deux composés constituent des sources d'énergie alternatives au sulfure pour les communautés chimiosynthétiques peuplant les sources hydrothermales.

MÉTHANE ET SULFURE AU MENU

Sur le site *Rainbow*, au sud des Açores, où les fluides sont très concentrés en fer et les sulfures libres quasi absents de l'environnement, le méthane constitue par exemple la source d'énergie principale de la moule *Bathymodiolus azoricus*. Celle-ci est aussi associée à des bactéries sulfo-oxydantes, et cette double symbiose lui permet de proliférer sur de nombreux sites de la dorsale Atlantique, aux teneurs variables en méthane et en sulfure.

Outre *Rainbow*, plusieurs sites hydrothermaux sont situés sur des roches serpentinisées : *Logatchev*, *Ashadze*… Ce dernier, découvert en 2007 par une équipe franco-russe, est le plus profond, à 4 000 mètres sous la surface. Sur les dorsales océaniques au volcanisme peu actif, qualifiées de lentes, ces environnements offrent une large gamme d'habitats aux populations chimiosynthétiques, dont la croissance et l'extinction sont rythmées par la durée de vie des sources, souvent éphémères. Sur certains sites, les fluides sont non pas acides, mais basiques. Les fumeurs noirs sont alors remplacés par de spectaculaires « cités blanches » (*voir la figure page ci-contre*). Celles connues aujourd'hui sont principalement peuplées de microorganismes, mais elles pourraient avoir abrité des faunes macroscopiques abondantes.

Les sites hydrothermaux offrent donc de multiples preuves des spectaculaires facultés d'adaptation des organismes, mais ce n'est pas leur seul intérêt. Ils représentent aussi des réserves potentielles d'hydrogène pour nos sociétés humaines à la recherche d'énergies non polluantes. ■

BIBLIOGRAPHIE

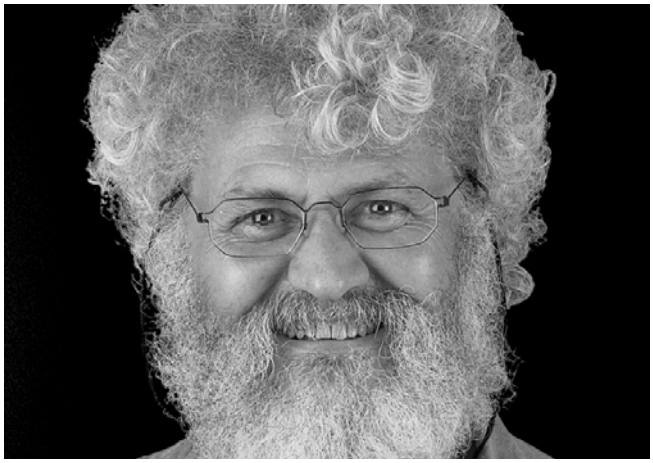
S. TOXVAERD, A Prerequisite for Life, *J. Theor. Biol.*, vol. 474, pp. 48-51, 2019.

E. BAKER *ET AL.*, How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 449, pp. 186-196, 2016.

J. RESING *ET AL.*, Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean *Nature*, vol. 523, pp. 200-203, 2015.

N. LE BRIS et F. GAILL, How does the annelid *Alvinella pompejana* deal with an extreme hydrothermal environment ?, in Rev. in Env. Sc. *Biotech.*, vol. 6, pp. 197–221, 2007.

ÉRIC KARSENTI



« Plusieurs milliers d'espèces de plancton repérées par *Tara Oceans* sont inconnues »

L'étude du plancton océanique et de son rôle écologique était le principal objectif de l'expédition *Tara Oceans*. Pouvez-vous nous rappeler ce que recouvre le terme de plancton ?

Éric Karsenti : Le plancton (marin) est constitué de tous les organismes vivants qui se laissent dériver à grande distance dans l'océan, même si beaucoup d'entre eux, comme les méduses, peuvent se déplacer activement sur de courtes distances. Cela inclut donc les virus, les bactéries et archées, les protistes (c'est-à-dire les eucaryotes unicellulaires tels que les protozoaires et les microalgues), le zooplancton, constitué d'animaux pluricellulaires dont la taille va d'environ 0,1 millimètre à plusieurs centimètres, et le phytoplancton (le plancton végétal).

BIO EXPRESS

10 SEPTEMBRE 1948
Naissance à Paris

1979
Thèse à l'institut Pasteur

1996
Création du département de biologie cellulaire et de biophysique au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL).

2009
Directeur scientifique de l'expédition *Tara Oceans*.

2015
Médaille d'or du CNRS.

Pour quelles raisons l'expédition *Tara Oceans* a-t-elle été mise en place ?

Éric Karsenti : L'idée initiale était de monter une expédition médiatique, dans un objectif de vulgarisation scientifique, pour parler au grand public d'évolution, de biologie marine… Mais le coût d'une telle opération s'est révélé prohibitif.

Par ailleurs, en discutant avec Christian Sardet et Gaby Gorsky, de l'observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer, ainsi qu'avec d'autres chercheurs, je me suis aperçu qu'on ne savait presque rien sur le plancton à l'échelle globale, alors même que les microorganismes marins ont joué un rôle de premier plan dans l'évolution de la vie sur Terre, par exemple en enrichissant l'atmosphère terrestre en oxygène. Ainsi a émergé, notamment au travers de discussions avec Gaby Gorsky,

© Tara Oceans

Colomban de Vargas et d'autres, l'idée de caractériser de façon exhaustive l'écosystème planctonique, des virus jusqu'aux larves de poissons.

C'est cette vision que nous avons réussi à faire financer en partie par des organismes publics (CNRS, CEA, EMBL…). Nous avons recruté des spécialistes de diverses disciplines, sollicité la fondation Tara Océan et sa goélette du même nom et, ce qui était une partie essentielle de l'entreprise, nous avons défini les procédures d'échantillonnage, en fonction des classes d'organismes et des objectifs scientifiques que nous nous sommes fixés.

Y avait-il déjà eu d'autres missions analogues d'exploration du plancton ?

Éric Karsenti : Depuis Darwin et son grand voyage autour du monde à bord du *Beagle*, et surtout l'expédition du *Challenger* (1872-1876) qui est à l'origine de l'océanographie moderne, il y a eu peu d'expéditions à long terme en circumnavigation avec un programme intégré. Mais il y a une dizaine d'années, le biologiste et homme d'affaires américain Craig Venter a monté une expédition d'échantillonnage de la diversité génétique des bactéries océaniques. Cette *Global Oceanic Sampling Expedition,* qui s'est déroulée de 2004 à 2006, a consisté à pomper l'eau en surface pour recueillir les bactéries et séquencer globalement leurs génomes. En cela, Craig Venter a été un précurseur de la métagénomique, démarche qui consiste à analyser le matériel génétique de toute une population de microorganismes différents. Mais d'une part les techniques de séquençage de l'époque étaient encore rudimentaires, d'autre part cette exploration se limitait à la génétique et ne cherchait pas du tout à caractériser l'écologie des communautés microbiennes. Son envergure n'est donc pas comparable à celle de *Tara Oceans*.

De quelle façon la mission *Tara Oceans* se déroulait-elle ?

Éric Karsenti : L'équipage était constitué de six marins, six scientifiques, un journaliste et un artiste. Nous naviguions pendant trois ou quatre jours, puis restions en station 60 heures en général pour collecter des échantillons à différentes profondeurs – de la surface jusqu'à 600 mètres.

Pour les protistes et autres microorganismes, il suffisait de pomper et filtrer une centaine de litres d'eau. Pour les organismes plus gros, qui sont plus parsemés, il fallait des volumes d'eau beaucoup plus importants qu'il n'était pas question de pomper : cela aurait nécessité des moyens trop lourds. Leur récolte s'effectuait donc en laissant traîner des filets, équipés de débitmètres et dont la maille avait une taille adaptée aux organismes visés.

Les échantillons étaient généralement conservés à −20 °C, parfois à la température de l'azote liquide (−195 °C) ; certains organismes collectés étaient placés dans du formol. Tous les mois ou deux, on les expédiait à l'EMBL, à Heidelberg, qui les répartissait ensuite entre le Genoscope, à Évry, et les laboratoires de Villefranche-sur-Mer, de Roscoff, de Barcelone et de l'université de l'Arizona. Cela représentait à chaque fois environ une tonne de matériel !

Les sites d'échantillonnage étaient-ils choisis au hasard ?

Éric Karsenti : Pas du tout. Nous nous sommes efforcés de faire un choix de stations représentatives (il y en a eu 210 au total) en nous appuyant sur des cartes satellitaires dressées par des océanographes, en tenant compte des paramètres environnementaux (vent, température, courant…), de la richesse ou de la pauvreté du milieu, des particularités de certains endroits… Nous voulions un échantillonnage non seulement représentatif et assez complet, mais aussi qui soit corrélé avec les données environnementales et l'histoire océanographique de la masse d'eau sondée. C'est ce qui fait la force de *Tara Oceans* : une telle approche écosystémique n'avait jamais été adoptée auparavant.

Comment les échantillons sont-ils analysés ?

Éric Karsenti : Les analyses sont de deux types. Il s'agit d'une part d'imagerie, d'autre part de séquençage. L'imagerie, par microscopie, par cytométrie en flux…, est essentiellement faite dans les laboratoires que j'ai mentionnés, mais il y avait aussi de l'imagerie réalisée *in situ*, grâce à une caméra que l'on immergeait à des profondeurs variables (entre la surface et 1 000 mètres de profondeur) et qui permettait d'enregistrer des images d'organismes de taille supérieure à 0,5 millimètre environ.

Quant au séquençage, il est question aussi bien de métagénomique, c'est-à-dire du séquençage de l'ADN global de l'échantillon, que de métatranscriptomique, c'est-à-dire du séquençage de son ARN. Ces analyses apportent des informations sur la diversité génétique et taxonomique de chaque échantillon, ainsi que sur les gènes exprimés. À ces « métaséquençages » s'est ajouté le séquençage de quelques génomes entiers de petits organismes eucaryotes, afin de fournir des références de comparaison. De ce point de vue, le Genoscope, sous l'impulsion de Jean Weissenbach puis de Patrick Wincker, a réalisé un travail colossal et d'une très grande qualité.

Qu'a-t-on ainsi appris sur la diversité du microplancton marin ?

Éric Karsenti : Pour les protistes, les données des séquençages effectués indiquent qu'ils regroupent de l'ordre de 150 000 genres rien que dans les eaux de surface, alors qu'on ne connaissait une dizaine de milliers d'espèces seulement. En termes d'espèces, cela fait bien sûr beaucoup plus, peut-être entre 1 et 10 millions. Et le tiers environ de ces unités taxonomiques n'ont pu être rattachées à aucun des groupes connus d'eucaryotes…

Pour ce qui est des virus et bactéries, les analyses montrent qu'ils englobent près de 40 millions de gènes différents, dont la plupart (59 %) semblent bactériens. Une partie des gènes répertoriés provient d'études et missions antérieures, mais plus de 80 % d'entre eux proviennent du recensement de *Tara Oceans*. On estime aussi qu'environ 30 % des dizaines de milliers d'espèces de bactéries contenues dans les échantillons de

« Nous avons choisi des sites représentatifs en nous appuyant sur des cartes dressées par des océanographes »

Tara Oceans n'étaient pas connues de la science. Ce chiffre serait de l'ordre de 90% pour les virus.

Vous avez obtenu des résultats surprenants concernant des protistes nommés rhizaires. De quoi s'agit-il ?

Eric Karsenti : Les rhizaires constituent un grand groupe de protistes auquel appartiennent notamment les radiolaires. Ils ont un squelette minéral dont émergent des pseudopodes. Certains rhizaires sont des géants dans le microplancton et peuvent atteindre plusieurs centimètres, mais ils sont extrêmement fragiles et passent donc le plus souvent inaperçus dans les prélèvements. Avec plusieurs autres chercheurs, Tristan Biard, de la station biologique de Roscoff, a étudié les rhizaires de taille supérieure à 0,6 millimètre en examinant 1,8 million d'images prises par une caméra spéciale immergée, dans le cadre de 11 campagnes océaniques qui se sont déroulées entre 2008 et 2013, en particulier celle de *Tara Oceans*.

Et quels ont été les résultats ?

Eric Karsenti : Cette étude a notamment permis d'estimer la biomasse constituée par les rhizaires vivant dans les 200 premiers mètres de profondeur. Elle se révèle énorme, très supérieure à ce que l'on soupçonnait : en carbone, elle équivaut à plus de 5% de celle de tous les organismes marins. De plus, les rhizaires sont relativement abondants dans les vastes régions océaniques pauvres en nutriments, où ils seraient avantagés par leur capacité à vivre en symbiose avec des microalgues. Leur biomasse y est équivalente à celle de tous les autres organismes planctoniques de taille comprise entre 0,2 et 20 millimètres. Ces découvertes modifient notre compréhension des écosystèmes planctoniques, et suggèrent que les rhizaires pourraient avoir un poids important dans le bilan des flux de carbone des océans.

Y a-t-il d'autres études de *Tara Oceans* qui portent sur les flux de carbone ?

Eric Karsenti : Lionel Guidi, du laboratoire de Villefranche-sur-Mer, et d'autres chercheurs en ont publié une en même temps que celle de l'équipe associée à Tristan Biard. En s'appuyant sur des analyses informatiques et génétiques, ils ont caractérisé certains réseaux d'organismes planctoniques qui sont associés à l'export de carbone dans les régions océaniques pauvres en nutriments, l'export de carbone désignant le processus par lequel le carbone contenu dans les organismes marins finit par couler et par se retrouver séquestré dans les fonds. Mais il reste encore beaucoup à comprendre…

Comment étudie-t-on les interactions de tous ces organismes ?

Eric Karsenti : Des méthodes bio-informatiques permettent, à partir des données des séquençages de l'ADN et de l'ARN des échantillons, qui renseignent sur la nature et l'abondance des différents organismes présents, de « cartographier » les interactions. Leur principe consiste à déterminer les cooccurrences et à les analyser. L'idée est par exemple que si un taxon (un type d'organismes apparentés) donné A se retrouve systématiquement dans les échantillons où est présent le taxon B, on « prédit » que les taxons A et B sont en interaction. On vérifie ensuite les prédictions bio-informatiques en observant au microscope certains des échantillons, pour confirmer par exemple que les organismes A et B sont bien physiquement associés.

On observe ainsi que la plupart des organismes sont en interaction, qu'il s'agisse de symbiose, de parasitisme ou de commensalisme. Ainsi, il n'y a quasiment pas de protistes isolés. On peut trouver aussi des relations d'exclusion (la présence d'une espèce excluant celle d'une autre), et les chercheurs ont constaté que de telles relations concernent globalement 20% des organismes planctoniques.

Ces cartographies des réseaux d'interactions prennent également en compte les paramètres environnementaux (pH, température, concentration en phosphates…). Or le rôle des facteurs environnementaux dans la composition des communautés planctoniques s'est révélé bien moins important qu'on ne le pensait : l'environnement explique seulement 18% des variations de composition.

Les microorganismes planctoniques sont-ils répartis de façon particulière dans les océans ?

Eric Karsenti : *Tara Oceans* a confirmé des choses que l'on savait déjà, comme le fait que la biodiversité du plancton est plus riche dans les régions tropicales mais qu'il est plus abondant dans les mers froides. Elle a aussi montré que la circulation océanique joue un rôle particulièrement important dans la façon dont se distribuent les communautés d'organismes planctoniques.

Par exemple, une étude a porté sur l'influence des anneaux d'Agulhas (ou anneaux des Aiguilles), de vastes tourbillons qui se forment à l'est de l'Afrique du Sud, entre l'océan Indien et l'océan Atlantique sud. Les données de *Tara Oceans* ont montré que ces anneaux forment une sorte de barrière qui isole l'une de l'autre les communautés planctoniques des deux océans. Plus généralement, l'analyse des données de l'expédition devrait fournir une vision globale de la concentration des organismes planctoniques et de leur diversité selon les régions. Et la comparaison avec ce que l'on sait sur les poissons sera sans doute utile pour la gestion des pêcheries.

« Les rhizaires auraient un poids important dans le bilan des flux de carbone des océans »

Le réchauffement climatique perturbe-t-il les populations de plancton ?

Eric Karsenti : *Tara Oceans* a mis en évidence une stricte corrélation entre la température et la composition en archées et bactéries du plancton. Dans les profondeurs où la lumière pénètre, la température est, de fait, le principal facteur environnemental qui influe sur la composition du plancton. On devrait donc pouvoir se faire une idée de la façon dont la distribution des organismes planctoniques

MODÉLISER L'ÉCOSYSTÈME OCÉAN

Fort des avancées en écosystémique globale réalisées dans la première décennie du projet *Tara Oceans* (2009-2019), et publiées dans les meilleures revues scientifiques, nous avons pu nous structurer en fédération de recherche (FR2022), un institut virtuel regroupant 22 équipes internationales (11 en France, dont la fondation Tara Océan) autour d'une nouvelle odyssée : *Tara GO-SEE* (Global Ocean Systems Ecology & Evolution).
L'objectif est de comprendre les principes fondamentaux d'écologie et d'évolution d'un premier écosystème complexe sur notre planète, en vue d'établir une théorie quantitative robuste de sa dynamique et de sa résilience. Entre les atomes, les cellules, les organismes, d'un côté, et le climat, les étoiles et les galaxies de l'autre, pour lesquels des centaines de milliards d'euros ont été dépensés pour leur étude, se trouvent les écosystèmes : ces réseaux de vie autoorganisés et adaptatifs, qui interagissent avec l'environnement sur de multiples échelles. Les écosystèmes sont peut-être les « objets » les plus complexes de notre Univers, car ils intègrent l'ensemble du vivant dans sa matrice physicochimique ; pour cette raison, ils ont longtemps échappé à la mesure scientifique et semblaient insondables. Or dans *Tara Oceans*, nous avons prouvé le contraire. Grâce à l'échantillonnage systématique du plancton marin sur des échelles taxonomiques (des virus aux animaux), systémique (des gènes aux organismes) et spatiotemporelle (4 ans sur les océans planétaires) intégrales, nous avons généré la plus grande base de données de séquences ADN/ARN et d'images d'organismes à l'échelle d'un biome.
Pour la première fois nous percevons les frontières de la complexité réelle d'un écosystème global, et nous avons développé des concepts et méthodes pour intégrer les données génétiques, d'imagerie, et environnementales (biophysicochimiques), et commencer à découvrir la structure et la dynamique du grand réseau de vie planctonique.
Dans *Tara GO-SEE*, nous proposons de poursuivre notre approche « pan-écosystémique » pour répondre, au cours des 10-15 prochaines années, à quelques questions fondamentales. Comment la vie s'est-elle diversifiée et complexifiée au niveau des écosystèmes ? Comment les organismes interagissent-ils et quelles sont les règles d'auto-organisation du vivant dans les écosystèmes ? Comment intégrer la complexité de la vie dans les modèles des grandes fonctions émergentes de l'océan (pompe à carbone, climat, réseaux trophiques et pêcheries).
Notre hypothèse principale est que les interactions des organismes et leurs comportements collectifs sont à la base des mécanismes qui génèrent la biodiversité et régulent les communautés. Or ces forces « symbiotiques » n'ont pas encore été quantifiées ni modélisées aussi bien en écologie qu'en évolution. Une approche au niveau de l'écosystème est nécessaire pour une compréhension holistique de ces processus qui pourraient tout simplement réguler notre monde.
Pour ce faire, nous allons non seulement continuer à exploiter les données écomorphogénétiques issues des expéditions *Tara Oceans* et *Tara Pacific*, mais aussi développer des nouvelles approches analytiques pour combler des lacunes d'information, et intégrer et formaliser les données hétérogènes.
Enfin nous retournerons en mer avec une nouvelle océanographie suffisamment flexible et réactive pour mesurer les processus clés de l'écosystème océan sur des échelles spatiotemporelles pertinentes.

L'écosystème marin, dont le plancton est un rouage clé, est-il l'« objet » le plus complexe de l'Univers ?

COLOMBAN DE VARGAS, FONDATION TARA OCÉAN

© G.Bounaud-C.Sardet-Sokanteseize-Tara Expeditions

changera avec le réchauffement climatique. Par ailleurs, les résultats que j'ai déjà évoqués concernant les flux de carbone sont un avant-goût de ce que l'on peut apprendre sur la place du plancton dans la machinerie climatique de la Terre.

Quelles suites aura *Tara Oceans* ?

Eric Karsenti : D'abord, l'exploitation complète des échantillons et données recueillis demandera encore quelques années de travail. De nouvelles publications sont d'ailleurs en cours, l'une sur la circulation océanique et la répartition du plancton, une autre sur la métatranscriptomique des eucaryotes, une troisième sur les îles du Pacifique et le rôle du fer, la quatrième sur les génomes de dizaines d'organismes unicellulaires clefs. Il reste aussi à exploiter la dernière phase de la mission, qui s'est déroulée dans l'océan Arctique. De plus, toutes les données de *Tara Oceans* sont mises en accès libre et public, ce qui permet à tous les chercheurs de les exploiter.

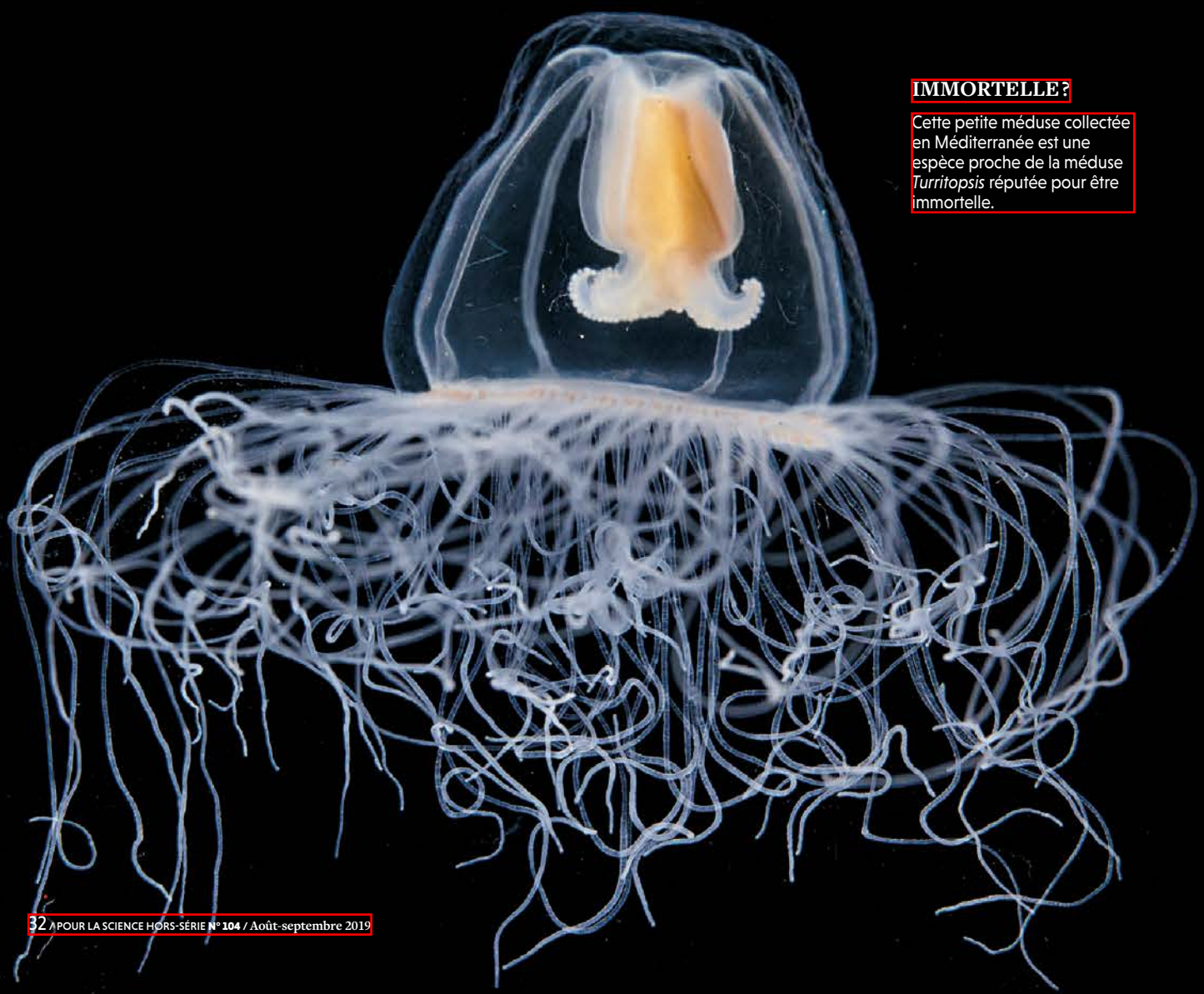
À cela s'ajoutent les données issues de la dernière expédition *Tara Pacific* (2016-2018), qui a porté sur les systèmes coralliens du Pacifique, et notamment le plancton qui y est associé. Mais nous avons surtout pu créer une fédération de recherche internationale en automne 2018, avec une vision renouvelée de notre projet au long cours de percer les mystères de l'écosystème océan (*voir l'encadré ci-dessus*). ■

Propos recueillis par Maurice Mashaal

© Lafrell-Tara Expéditions

Autant en emporte l'océan

De ses expéditions, la goélette *Tara* a collecté nombre de spécimens d'espèces planctoniques, pour beaucoup inconnues, qui se laissent porter au gré des courants dans les océans.



IMMORTELLE ?

Cette petite méduse collectée en Méditerranée est une espèce proche de la méduse *Turritopsis* réputée pour être immortelle.

© John-Dolan

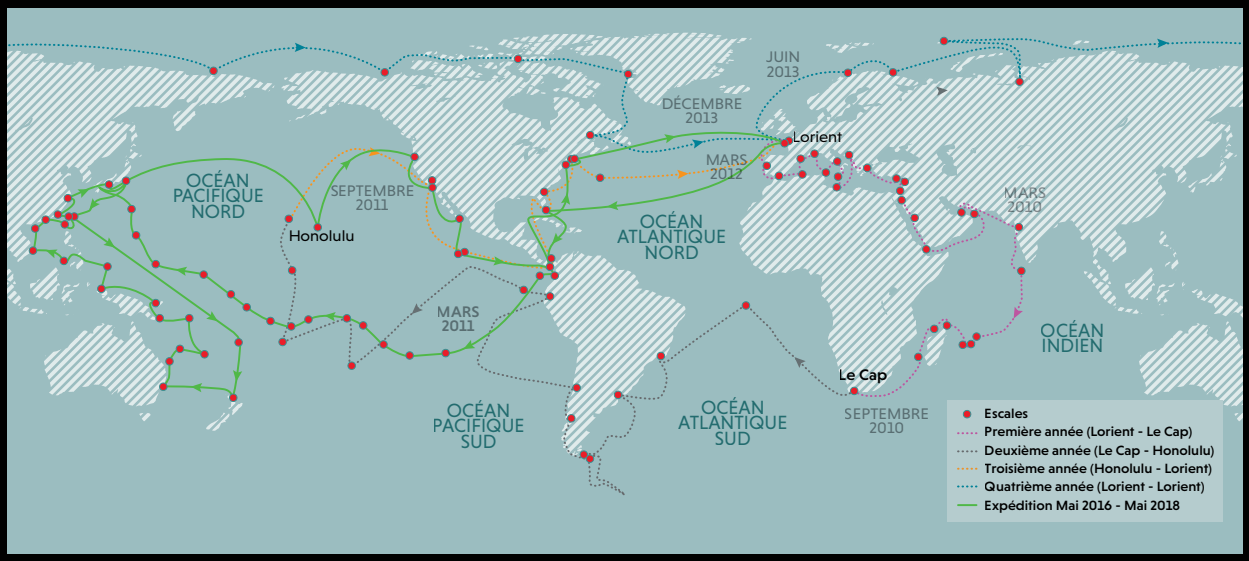
UNE FRUSTULE EN SILICE

Les diatomées, ici *Planktoniella sol*, sont des algues unicellulaires enveloppées dans un squelette en silice, la frustule.

LA GUERRE DES PTÉROPODES

Trois différents mollusques ptéropodes collectés en Méditerranée. Deux d'entre eux sont protégés par de fragiles coquilles calcaires. Ils sont des proies naturelles du troisième ptéropode sans coquille au premier plan.

© Christian Sardet, « Plankton – Wonders of the Drifting World » Univ. Chicago Press 2015, Noan LeBescol - CNRS - Tara Oceans, Eric Roettinger - Kah kai - Tara Oceans



D'après carte de be-poles/Tara Expéditions

La goélette *Tara* a plusieurs fois écumé les océans lors de 11 expéditions, comme *Tara Oceans* entre 2009 et 2013 *(en pointillé)*, *Tara Pacific* entre 2016 et 2018 *(en trait plein)*...

UN PLANCTON DISCO

Les cténaires sont des organismes carnivores. Ils se déplacent à l'aide de 8 rangées de cils qui sont chez certaines espèces bioluminescents et émettent des flashs lumineux et colorés. Ce juvénile a été collecté en mer Méditerranée.

UN VER MODÈLE

Platynereis dumerilii est un vers annélide au dimorphisme sexuel bien marqué : les femelles sont jaunes ; les mâles sont blancs sur une face, et rouge de l'autre. Ce ver est un organisme modèle en biologie et en génétique.

UN CRUSTACÉ BLEU

Les copépodes, comme ce spécimen bleu, sont de petits crustacés libres ou bien parasites. Certains sont les hôtes du vibrion du choléra, ce qui explique le lien entre changement climatique, blooms planctoniques et épidémies.

© Christian Sardet, « Plankton – Wonders of the Drifting World » Univ. Chicago Press 2015

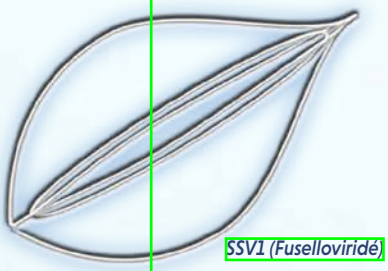
POISSON AU MENU

Cette méduse *Liriope* a attrapé un jeune poisson et l'a mangé en partie.

UN ÉVENTAIL DE RADIOLAIRES

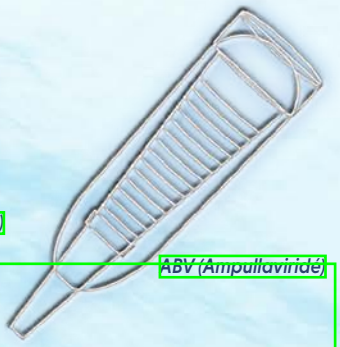
Cette photographie de radiolaires de la baie de Villefranche-sur-Mer montre une dizaine d'individus *Aulacantha scolymantha*, d'environ un millimètre de diamètre, deux grands radiolaires (*Thalassicolla pellucida* et *Thalassolampe margarodes*) et une colonie de *Collozoum inerme (en bas à droite)*. Les petits points ocre sont des microalgues vivant en symbiose avec ces protistes.

Les virus, piliers de la vie marine


SSV1 (Fuselloviridé)

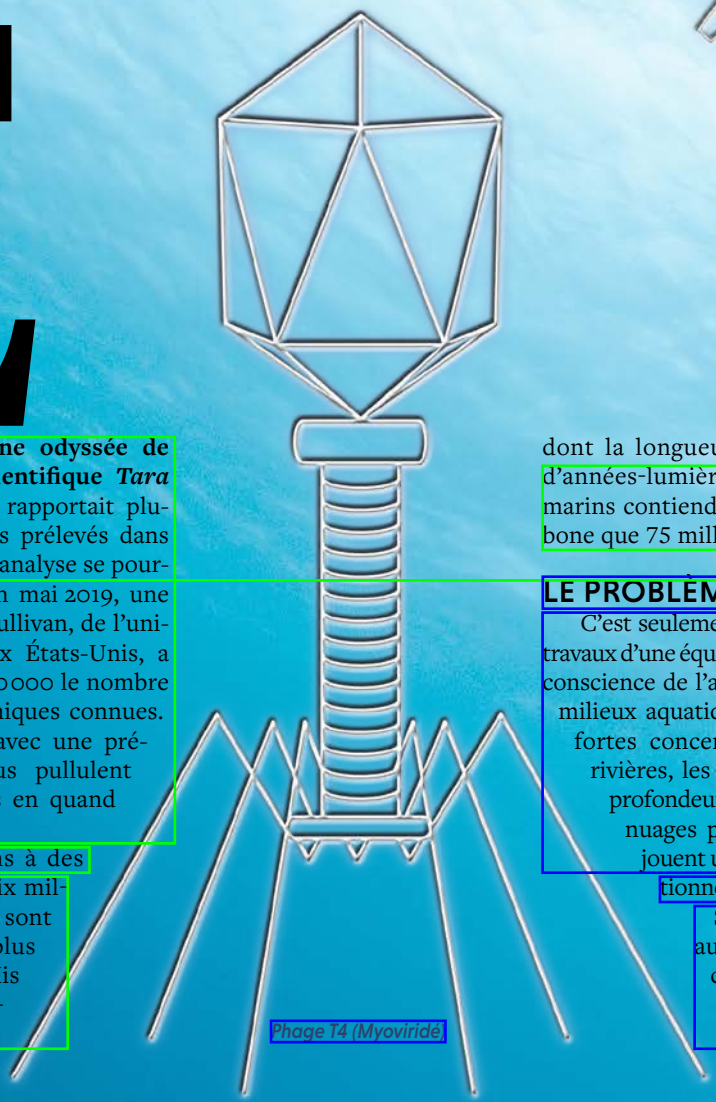
Abondants et variés – on n'en connaît sans doute qu'une infime partie –, les virus aquatiques sont des acteurs clés des écosystèmes marins.

SH1 (non classé)


ABV (Ampullaviridé)

En décembre 2013, après une odyssée de 938 jours, l'expédition scientifique *Tara Oceans* s'est achevée. Elle rapportait plusieurs milliers d'échantillons prélevés dans les océans du globe et dont l'analyse se poursuit encore. Pour preuve, en mai 2019, une étude dirigée par Matthew Sullivan, de l'université de l'État d'Ohio aux États-Unis, a porté de 16 000 à près de 200 000 le nombre de populations virales océaniques connues. Cette diversité va de pair avec une présence importante: les virus pullulent dans la mer. Souvenez-vous en quand vous boirez la tasse cet été!

Présents dans les océans à des concentrations avoisinant dix millions par millilitre, les virus sont les entités biologiques les plus nombreuses sur la planète. Mis bout à bout, ils constitueraient un collier de perles dont la longueur dépasserait dix millions d'années-lumière. Tous ensemble, les virus marins contiendraient plus d'atomes de carbone que 75 millions de baleines bleues.


Phage T4 (Myoviridé)

LE PROBLÈME DE LA DIVERSITÉ

C'est seulement à partir de 1989, grâce aux travaux d'une équipe norvégienne, que l'on a pris conscience de l'abondance des virus dans des milieux aquatiques variés. On a mesuré de fortes concentrations dans les lacs, les rivières, les glaces ou les sédiments, des profondeurs océaniques jusque dans les nuages parfois, ce qui suggère qu'ils jouent un rôle important dans le fonctionnement de la biosphère.

S'intéressant de plus en plus aux virus aquatiques, les chercheurs sont confrontés aujourd'hui à une difficulté de taille: leur diversité, les

© Jung Hsuan/shutterstock.com | Pour la Science

L'ESSENTIEL

- Les virus sont les entités biologiques les plus abondantes et les plus variées des milieux aquatiques.
- Par des mécanismes de transfert de gènes et de pression de sélection, les virus jouent un rôle clef dans le fonctionnement des écosystèmes et le maintien de leur biodiversité.
- La diversité des virus et celle de leurs hôtes sont indissociables. Aujourd'hui, la compréhension de leurs interactions constitue un des enjeux de l'écologie aquatique.

LES AUTEURS

STÉPHAN JACQUET
est directeur de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (Inra). Il travaille en écologie microbienne aquatique à Thonon-les-Bains.

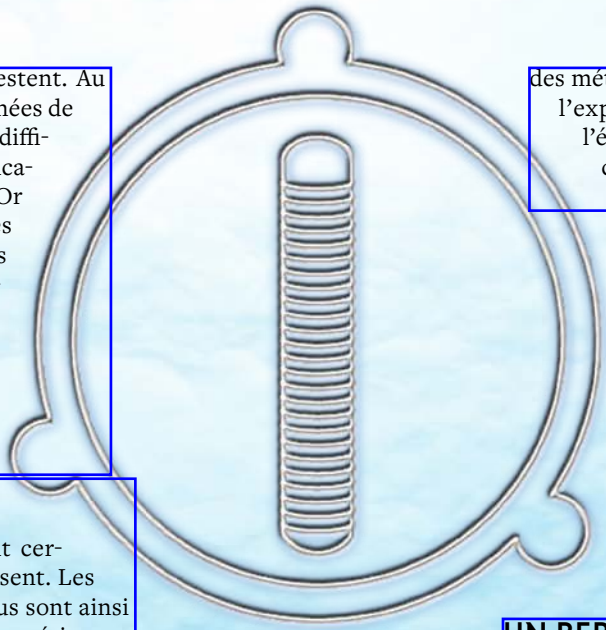
CAROLINE DEPECKER
est journaliste scientifique.

derniers travaux de Tara en attestent. Au regard de cette diversité, les données de référence sont rares, ce qui rend difficiles l'identification et la classification des nouveaux échantillons. Or le nombre d'échantillons analysés a considérablement augmenté ces dernières années, grâce à la multiplication des expéditions. Malgré la performance des outils de biologie moléculaire, au mieux 30 % des séquences génétiques virales examinées ont été identifiées.

Pour autant, les informations issues de ces analyses sont précieuses et bouleversent certains résultats admis jusqu'à présent. Les organismes colonisés par les virus sont ainsi bien plus variés que les espèces bactériennes pressenties. La forme et la taille de certains virus sont également surprenantes. Enfin, on commence à mesurer l'impact de la diversité virale sur le monde vivant. Grâce à divers mécanismes, comme la destruction d'une espèce dominante au profit d'espèces plus rares ou le transfert de gènes viraux vers l'hôte, les virus maintiennent la biodiversité des écosystèmes aquatiques et facilitent le brassage génétique.

Toutes les six à sept semaines pendant près de trois ans, des échantillons en provenance de la goélette *Tara* sont arrivés au Génoscope d'Évry, où leur matériel génétique viral fut analysé. La mission du voilier consistait à arpenter les océans afin d'y prélever tout type d'organisme marin invisible à l'œil nu. Objectif de l'expédition : étudier divers écosystèmes planctoniques, notamment les interactions des différents microorganismes les uns avec les autres ainsi qu'avec leur environnement physico-chimique.

Simultanément, les programmes Ovid (*Ocean VIrus Diversity*), de Matthew Sullivan, et *Tara-Girus*, de Hiroyuki Ogata, ont cartographié la géographie des diversités virales et



PSV (Globuloviridé)

des métabolismes associés tout au long de l'expédition. Ainsi, les résultats de l'étude de mai 2019 surprennent. Elle concerne des échantillons prélevés en 80 sites, jusqu'à 4 000 mètres de profondeur.

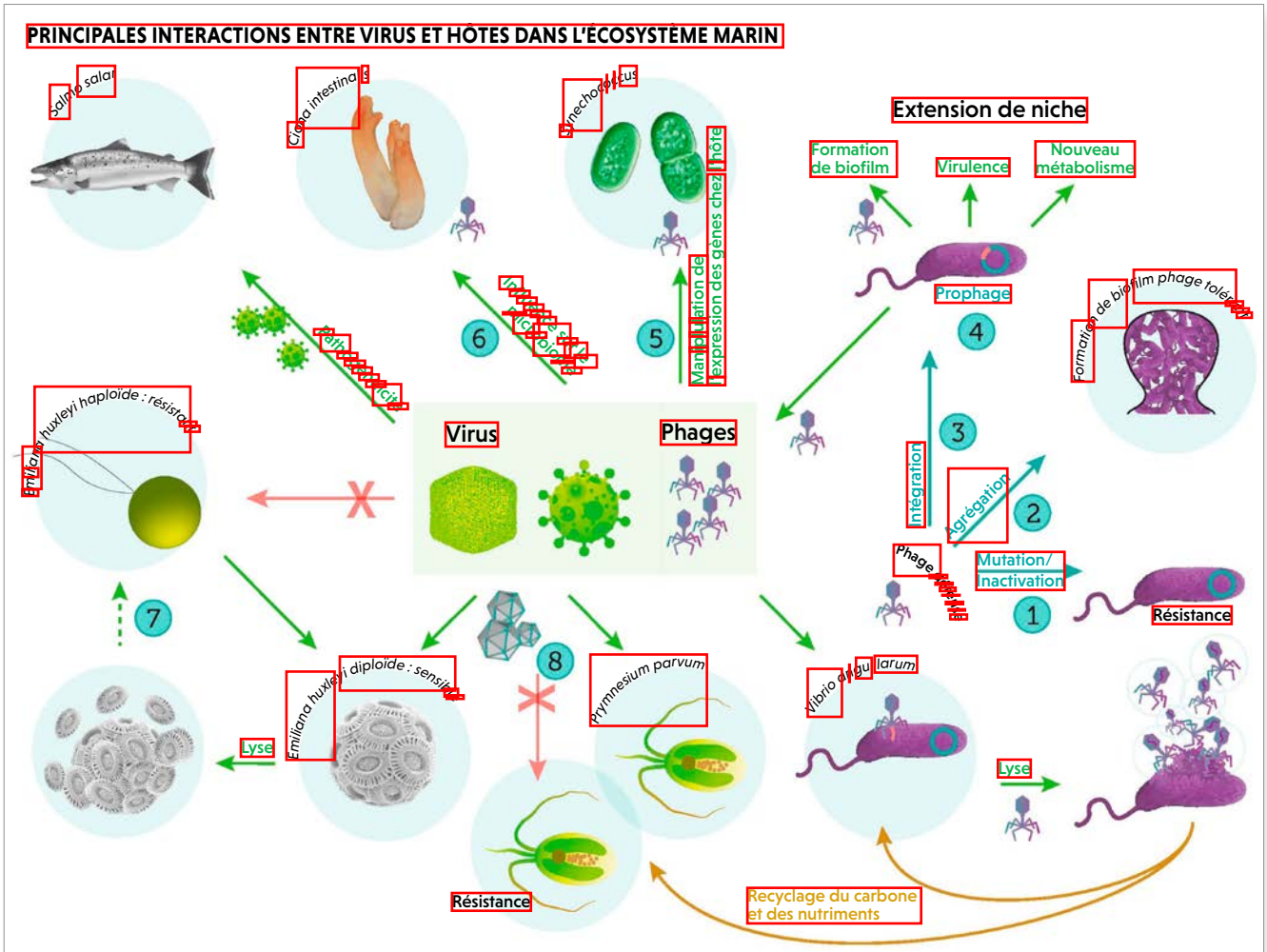
Grâce à de nouvelles méthodes de séquençage des génomes viraux, les chercheurs ont analysé les variations génétiques entre les individus au sein de chaque population virale, entre les populations au sein de chaque communauté virale et enfin, entre les communautés à travers plusieurs environnements de l'océan mondial. Que révèlent ces variations ?

UN BERCEAU EN ARCTIQUE

D'abord, la quasi-totalité des communautés de virus se répartit en seulement cinq groupes, selon leur localisation et leur profondeur. Ensuite, la diversité virale mesurée dans l'océan Arctique déroge à la règle selon laquelle la diversité est maximale au niveau des tropiques et diminue à mesure que l'on se rapproche des pôles. Ce gradient se vérifie chez les organismes cellulaires et multicellulaires, mais pas chez les virus. L'océan Arctique, fortement impacté par le changement climatique, serait le « berceau » de leur biodiversité.

D'autres programmes scientifiques sont arrivés à des conclusions similaires. Achevées en 2009, les expéditions océanographiques du programme Pame (*Polar Aquatic Microbial Ecology*) étudiaient la diversité et la distribution de l'ensemble des microorganismes habitant les régions polaires : dans ces endroits, les résultats montrent que les virus sont abondants, diversifiés et produits chaque jour en quantité.

Le programme GOS (*Global Ocean Sampling*), initié par Craig Venter, continue d'analyser des échantillons recueillis jusqu'en 2010. Les derniers résultats publiés, en 2017, concernaient les virus de la mer >



Baltique. De nombreux bactériophages, ou « phages » (ces virus majoritaires à la surface de la planète infectent les bactéries et les archées), y ont été identifiés, ainsi que des virus de poissons. Les auteurs concluaient sur l'importance des virus dans la régulation de l'ensemble des populations de la Baltique, des bactéries jusqu'aux espèces eucaryotes les plus complexes.

Le programme GOS avait auparavant permis d'analyser par séquençage massif des échantillons d'eau de différentes mers et provinces océaniques telles que la mer Noire, la mer Méditerranée, la mer du Nord, ainsi que les océans Atlantique, Pacifique, Indien et Antarctique. En moyenne, on constate que 200 litres d'eau de mer contiennent plus de 5 000 virus différents.

La diversité virale aquatique est surprenante. En 2005, Mya Breitbart, de l'université de Californie, et ses collègues ont observé que 30 à 90 % des séquences virales prélevées en zone côtière n'ont aucun homologue connu dans les bases de données génétiques existantes. Une autre équipe californienne, dirigée par Forest Rohwer, a peu après confirmé ce résultat et a proposé pour la première fois une vue d'ensemble de la diversité et de la répartition des virus marins.

À partir de 184 échantillons récoltés pendant dix ans jusqu'à 3 000 mètres de profondeur sur 68 sites différents (dans la mer des Sargasses,

© M. Middelboe et C. Brussaard, Viruses 2017, 9(10), 302

le golfe du Mexique, les eaux côtières de la Colombie-Britannique et l'océan Arctique), ces scientifiques ont montré que plus de 91% des séquences virales obtenues étaient inconnues. Parmi elles apparaissaient de nombreux cyanophages nouveaux (virus des cyanobactéries, une sous-classe de bactéries photosynthétiques) et des virus à ADN simple brin (virus dont les informations génétiques sont codées sur un seul brin d'ADN et non deux comme dans le génome des mammifères). Ainsi, selon leur estimation, la seule côte de Colombie-Britannique compterait quelque 129000 génotypes différents (un génotype est l'ensemble des constituants génétiques caractéristiques d'un seul organisme) dans les remontées d'eaux froides. L'ensemble de ces travaux révèle l'ampleur de notre ignorance: ils suggèrent qu'il existerait plusieurs centaines de milliers de génotypes viraux différents.

Nos analyses soulignent une biodiversité tout aussi élevée en eau douce. Avec Michaël DuBow, de l'université Paris-Sud, à Orsay, nous étudions la diversité des virus «de type T7», un groupe majoritaire parmi les virus de bactéries à ADN double brin. Nous avons détecté, dans les eaux superficielles du lac d'Annecy, plus de 6000 séquences génétiques différentes dans un même échantillon (une date, une profondeur), soit autant d'«espèces» virales potentielles.

On peut imaginer soigner des récifs coralliens infectés par des bactéries grâce à des virus

UN JUMBO POUR AIDER LE CORAIL

L'énorme quantité d'informations issues de la biologie cellulaire et moléculaire a remis à plat nos connaissances sur les virus aquatiques. Tout d'abord, ils arborent des structures moléculaires bien plus variées qu'on ne l'imaginait. On connaissait surtout les bactériophages. De fait, aujourd'hui encore, plus de 90% des virus connus sont regroupés dans l'ordre des Caudovirus, c'est-à-dire des phages à ADN double brin. Cette configuration à ADN double brin est aussi celle de nombreux virus du phytoplancton que l'on a rassemblés en une famille, les PhycoDNAviridés. Néanmoins, des virus à ARN et, plus récemment, d'autres à ADN simple brin, ont aussi été observés.

Parmi ces derniers, Bonaishi se révèle potentiellement intéressant. Le génome inhabituellement long (303 paires de bases) du phage récemment isolé dans la baie Van Phong, au Vietnam, lui vaut d'être dans la catégorie «phage Jumbo». Ce virus infecte les bactéries *Vibrio coralliilyticus*, pathogènes fréquents des algues *Symbiodinium*, hôtes photosynthétiques des coraux. D'où l'idée de soigner les récifs par phagothérapie.

La littérature a essentiellement fait la part belle aux virus à ADN et aux phages. Mais on sait depuis une dizaine d'années que les virus à ARN sont aussi très abondants dans l'océan et jouent des rôles sûrement clés dans la dynamique, la distribution et la diversité du plancton.

Plusieurs études ont détecté de nombreux virus à ARN différents infectant le plancton, mais seuls quelques-uns ont été isolés et caractérisés, à cause de la lourdeur des techniques nécessaires. Plus récemment, la métagénomique, c'est-à-dire l'analyse du génome global de tous les microorganismes présents dans un échantillon (*voir la figure page 41*), a mis en lumière l'existence de virus appartenant à la superfamille des Picornaviridés, des minuscules virus à ARN longtemps passés inaperçus.

En 2006, une étude d'Alexander Culley, de l'université d'Hawaï, a indiqué qu'aucun des virus à ARN recueillis dans diverses eaux côtières n'appartenait à la longue liste des phages. Cette étude corroborait l'idée selon laquelle la plupart des virus à ARN ont pour hôtes non pas des procaryotes (bactéries ou archées), mais des eucaryotes, c'est-à-dire des organismes cellulaires à noyau bien différencié tels que les algues, les mollusques, les arthropodes, les poissons et les mammifères. De fait, la diversité virale observée ressemblait à celle de virus infectant des plantes ou des animaux terrestres, déjà connue et répertoriée dans les bases de données génomiques.

DES QUASI-ESPÈCES DE VIRUS

En 2019, Curtis Suttle, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, et ses collègues ont livré une importante quantité de données métagénomiques relatives à ce type de virus: ces informations constituent ainsi une base de référence pour les prochaines études des virus à ARN. Ils ont également découvert de nouveaux virus de la famille des *Marnaviridae*, la plus grande. Enfin, les études révèlent que les virus à ARN sont ubiquitaires de par le monde et sont, pour l'essentiel en cours de spéciation: les auteurs parlent de quasi-espèces.

En 2018, les travaux de Takuro Nunoura, de l'Agence japonaise pour la science et la technologie marines et terrestres (Jamstec), à Yokosuka, et de ses collègues ont mis en évidence la diversité des virus à ARN. Avec leur méthode inédite, ils ont révélé la part importante, et jusque-là sous-estimée, des virus à ARN inclus dans des cellules eucaryotes (leurs hôtes).

La découverte des virus aquatiques à ADN simple brin est plus récente encore que celle des virus à ARN. Connue pour infecter les plantes et les animaux – surtout les oiseaux, le porc et les bovins –, cette catégorie virale joue un rôle économique important en détruisant les récoltes ou en infectant le bétail. En analysant la communauté virale de divers écosystèmes marins, des biologistes de l'université de San Diego, en Californie, ont identifié de tels virus en milieu aquatique, qui ressemblaient aux phages de la famille des Microviridés.

Depuis quelques années, un nouveau type de virus a été identifié : le virus de virus

LES GÉANTS DES MERS

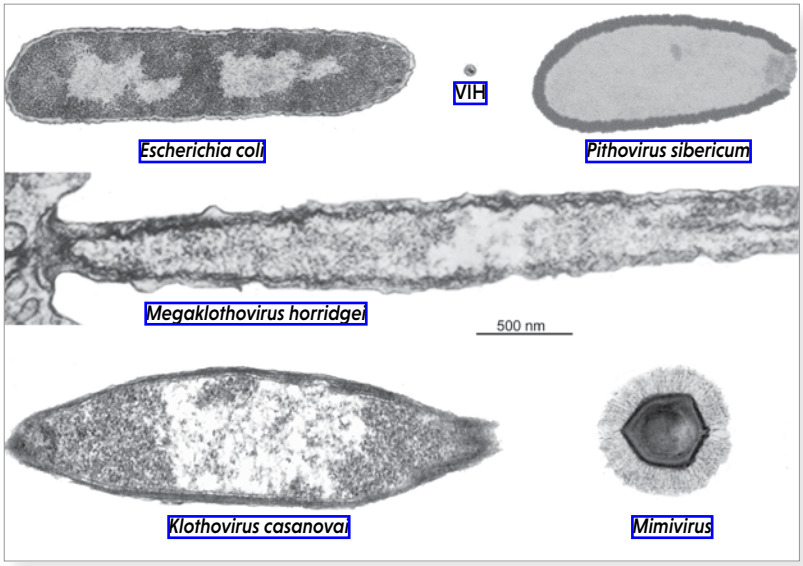
L'inventaire des virus marins ne serait pas complet sans les virus géants (ou girus) dont certains associent, à l'instar des cellules de mammifères, de l'ADN et de l'ARN. C'est le cas de *Marseillevirus*, isolé dans une amibe d'eau douce. Le génome de ce virus ressemble à une mosaïque de gènes issus des trois règnes du vivant : bactéries, eucaryotes et archées !

La plupart des virus aquatiques mesurent entre 30 et 60 nanomètres. Toutefois, depuis 16 ans, les girus ont fait exploser les critères de taille. Le premier, identifié en 2003 par l'équipe de Didier Raoult au cœur d'une amibe *Acanthamoeba polyphaga*, ressemblait tant à une bactérie, notamment par sa taille, qu'il fut nommé *Mimivirus* (pour *Mimicking Microbe Virus*). Depuis, les virus géants (*Mamavirus, Medusavirus, Tupanvirus*...) ont été retrouvés un peu partout dans le monde, dans divers types de milieux.

Ces girus se distinguent aussi par leur taille, bien supérieure à la « normale ». Le record fut quelques années détenu par *Megavirus chilensis*, isolé des eaux côtières du Chili en 2010 : son génome compte près de 1 260 millions de paires de bases et le diamètre de sa capside – son enveloppe – est de 440 nanomètres sans sa couronne de fibrilles (une bactérie compte entre 100 000 et plusieurs millions de paires de bases et mesure en général quelques micromètres, soit quelques milliers de nanomètres).

Le record de *Megavirus chilensis* a été battu en 2018, à l'occasion de la réanalyse de photographies de microscopie électronique des années 1980. C'est de cette façon que Brianna Bullard et George Shinn, de l'université du Nebraska, aux États-Unis, ont découvert les *Meelsvirus*, des virus de 1,25 micromètre de longueur, infectant les noyaux des cellules d'*Adhesisagitta hispida*, des vers prédateurs du groupe des Chétognathes. Un an plus tard, dans des conditions similaires (une réinterprétation de microphotographies de 1967, déjà révisées en 2003), Roxane-Marie Barthélémy, de l'université d'Aix-Marseille et ses collègues mirent au jour deux virus fusiformes qui infectent les cellules d'autres Chétognathes : *Klothovirus casanovai* de 3,1 micromètres de longueur et *Megaklothovirus horridgei* de plus de 3,9 micromètres (la photographie est tronquée). C'est deux fois la longueur de la bactérie *Escherichia coli* (*voir la figure ci-dessous*) ! Ces trois énormes virus sont de rares exemples de girus infectant des animaux pluricellulaires.

Les premiers Pandoravirus, d'autres virus géants, avaient été découverts en 2013, par l'équipe de Chantal Abergel et Jean-Michel



Depuis une quinzaine d'années, on découvre des virus géants. En voici quelques spécimens comparés à la bactérie *Escherichia coli* et à un virus « classique » (le VIH). *Pithovirus sibericum*, découvert en 2014, infecte les amibes. *Megaklothovirus horridgei* et *Klothovirus casanovai* repérés en 2019, sont les hôtes de vers marins Chétognathes *(à droite, une tête de Spadella cephaloptera)*.

© Dom 751 et Yvan Perez

Claverie : *Pandoravirus salinus*, près des côtes chiliennes, à l'embouchure de la rivière Tunquen et *Pandoravirus dulcis*, près de Melbourne, en Australie. D'environ un micromètre de longueur, ils sont visibles au microscope optique, et contiennent jusqu'à 2 500 gènes ! Leur nom évoque la boîte de Pandore mythologique, car leurs caractéristiques balaient tout ce que l'on croyait savoir des virus, et certains y voient même une nouvelle forme de vie.

En 2018, la famille s'est agrandie avec trois autres pandoravirus mis au jour : *Pandoravirus macleodensis* à nouveau près de Melbourne, *Pandoravirus neocaledonia* à proximité de Nouméa, en Nouvelle Calédonie et *Pandoravirus quercus* à Marseille. Selon les découvreurs, avec leurs génomes géants aux nombreux gènes sans équivalent, les pandoravirus seraient des fabriques à nouveaux gènes, qui apparaissent par hasard et qui sont donc différents d'une souche à une autre.

LES VIRUS DE VIRUS

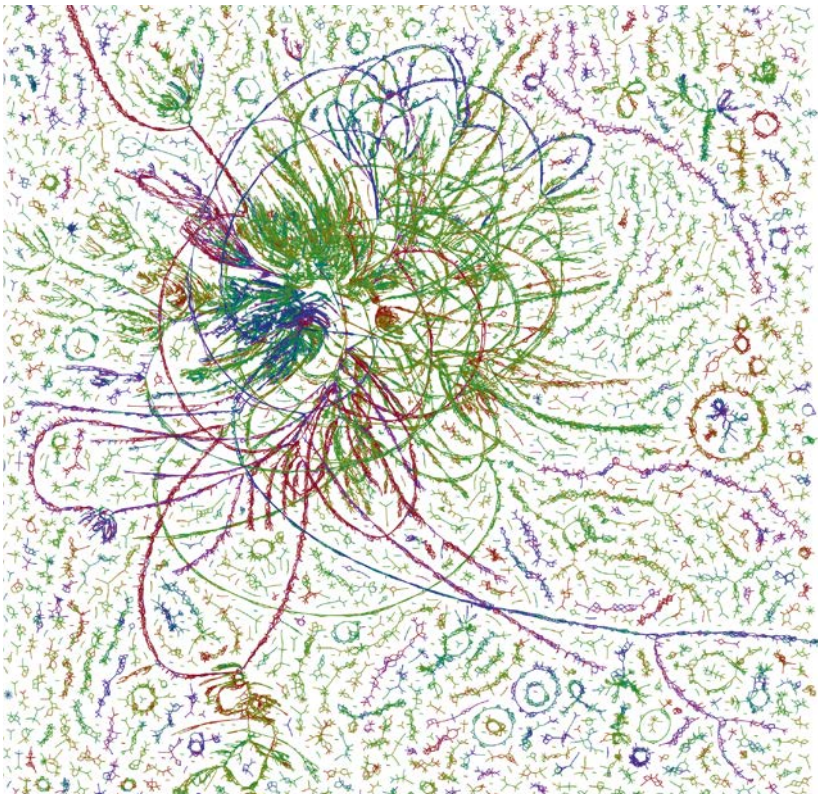
Les virus géants présentent d'autres particularités. D'une part, contrairement aux virus « classiques », certains, comme *Mimivirus*, ne détournent pas la machinerie cellulaire de l'hôte pour que celui-ci synthétise les protéines nécessaires à leur multiplication. Leur génome contient des gènes qui leur permettent d'assurer cette fonction. D'autre part, ce type de virus peut lui-même être infecté par un autre virus. Depuis peu en effet, un nouveau type de virus a été identifié : le virus de virus.

Le premier de ce genre, *Spoutnik*, a été trouvé dans *Mamavirus*, dont il empêche le développement normal, mais dont le matériel génétique lui est nécessaire pour proliférer. De même qu'un bactériophage infecte une bactérie, ce pathogène fut le premier membre d'une catégorie virale inédite : les virophages.

En 2011, Matthias Fischer, de l'université de Colombie-Britannique, a découvert *Mavirus*, un virus du virus *CroV* (*Cafeteria roenbergensis virus*) qui infecte l'organisme marin *Cafeteria roenbergensis*.

La présence de séquences génétiques associées au virus *Spoutnik* dans des échantillons d'eau de mer, mise en évidence par l'équipe de Didier Raoult, suggère que cette interaction virale originale n'est pas un cas isolé. Les biologistes se penchent à présent sur l'interaction du plancton marin, des virus géants et de leurs propres virus parasites.

Les virus se distinguent aussi par la diversité de leurs formes. Leur étude par microscopie électronique a montré, dans les systèmes aquatiques, la prédominance des phages à ADN double brin, constitués d'une tête icosaédrique (à 20 faces) et d'une queue de longueur variée. Néanmoins, dans les milieux hypersalés ou les sources géothermales, les virus d'archées prennent des formes inhabituelles. Bouteilles, ampoules, gouttes, épines, billes, filaments, à une ou deux queues… D'aillerus, les dizaines de virus isolés et décrits sont regroupées en quelques familles selon leur forme.



© Vaughn Iverson, Université de Washington

Représentation imagée du métagénome d'un échantillon marin. Chaque chaîne représente une séquence ADN reconstituée par analyse génomique. Les longues chaînes représentent des séquences de procaryotes, et les petites circulaires, des séquences de virus ou de plasmides (des molécules d'ADN autres que l'ADN chromosomique, chez les bactéries).

VIRUS ET HÔTES COÉVOLUENT

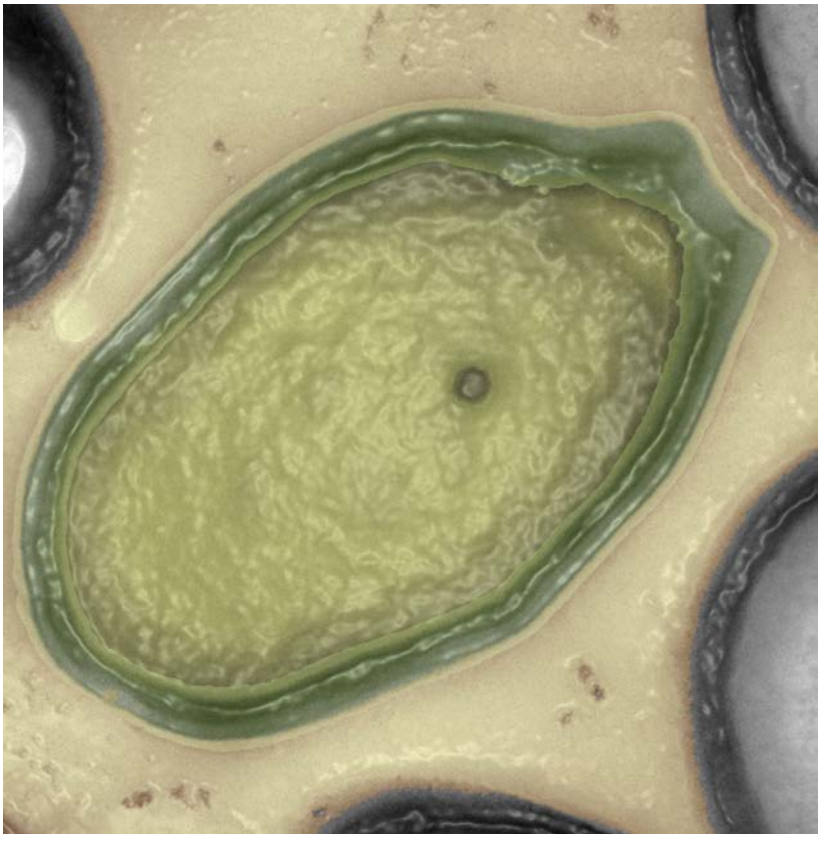
La diversité des virus aquatiques suscite de nombreuses questions sur l'histoire évolutive des virus et celle de leurs hôtes. Quand et comment les virus sont-ils apparus ? La spécificité des virus pour leurs hôtes s'est-elle forgée avant ou après la séparation, sur l'arbre de l'évolution, des règnes du vivant ? On a en effet constaté que généralement, chaque type de virus a un hôte privilégié et, inversement, que chaque procaryote est la cible d'un virus particulier. Notamment, ils n'infectent pas des organismes des autres règnes du vivant. L'étude phylogénique des virus aquatiques, de leur diversité et de ses liens avec la diversité du vivant apporte des pistes de réponses.

Tout d'abord, des similitudes (des protéines de la capside identiques, par exemple) ont été observées chez les virus infectant les trois règnes du vivant, ce qui suggère que les virus existaient avant la divergence de ces règnes. Au cours de l'émergence de ces trois domaines du vivant, des virus auraient été sélectionnés et auraient ensuite coévolué avec leurs hôtes. Trois populations virales auraient ainsi connu en parallèle des histoires différentes, associées à celles des trois domaines du vivant.

Plusieurs mécanismes permettent cette coévolution des virus et de leurs hôtes et, de façon plus générale, lient étroitement diversité virale et diversité du vivant. Les deux principaux sont la pression de sélection qu'exercent les virus sur les populations de procaryotes (bactéries et archées), et le transfert de gènes.

Un milieu donné comporte divers procaryotes dont le nombre fluctue en fonction de la pression de sélection exercée par les virus et ce, de diverses façons. En «tuant le meilleur», c'est-à-dire en parasitant l'espèce la plus compétitive (qui est souvent la plus abondante) dans un écosystème donné, les virus laissent vacante une niche écologique où les espèces plus rares – moins compétitives pour les ressources nutritives, notamment – peuvent alors se développer. Celles-ci profitent encore des éléments nutritifs relargués lors de la destruction cellulaire des espèces dominantes – la lyse virale. Enfin, la lyse libère des enzymes qui perturbent les cellules, détruisant les espèces les plus sensibles. La conjonction de ces effets accroît la diversité cellulaire et, par là même, celle des fonctions codées dans les génomes du milieu.

À Thonon-les-Bains, nous avons illustré ces différents processus lors d'expériences consistant à augmenter ou réduire le nombre de virus bactériophages ou cyanophages au sein d'échantillons. Ces variations ont eu un impact mesurable sur le nombre de populations de microorganismes, planctoniques notamment. Elles ont aussi modifié la quantité de matière organique libérée sous forme de carbone ou de phosphore, ou encore la structure de la communauté bactérienne et la proportion de bactéries dites lysogéniques. Ces bactéries portent un virus «dormant», c'est-à-dire qui ne se réplique pas, mais qui peut se «réveiller» à tout moment en fonction de son environnement.



Les pandoravirus, en forme d'outre, sont parmi les virus aquatiques les plus déconcertants. Géants parmi les géants, ils produisent au hasard de nombreux gènes, indépendamment. Sont-ils une nouvelle forme de vie ?

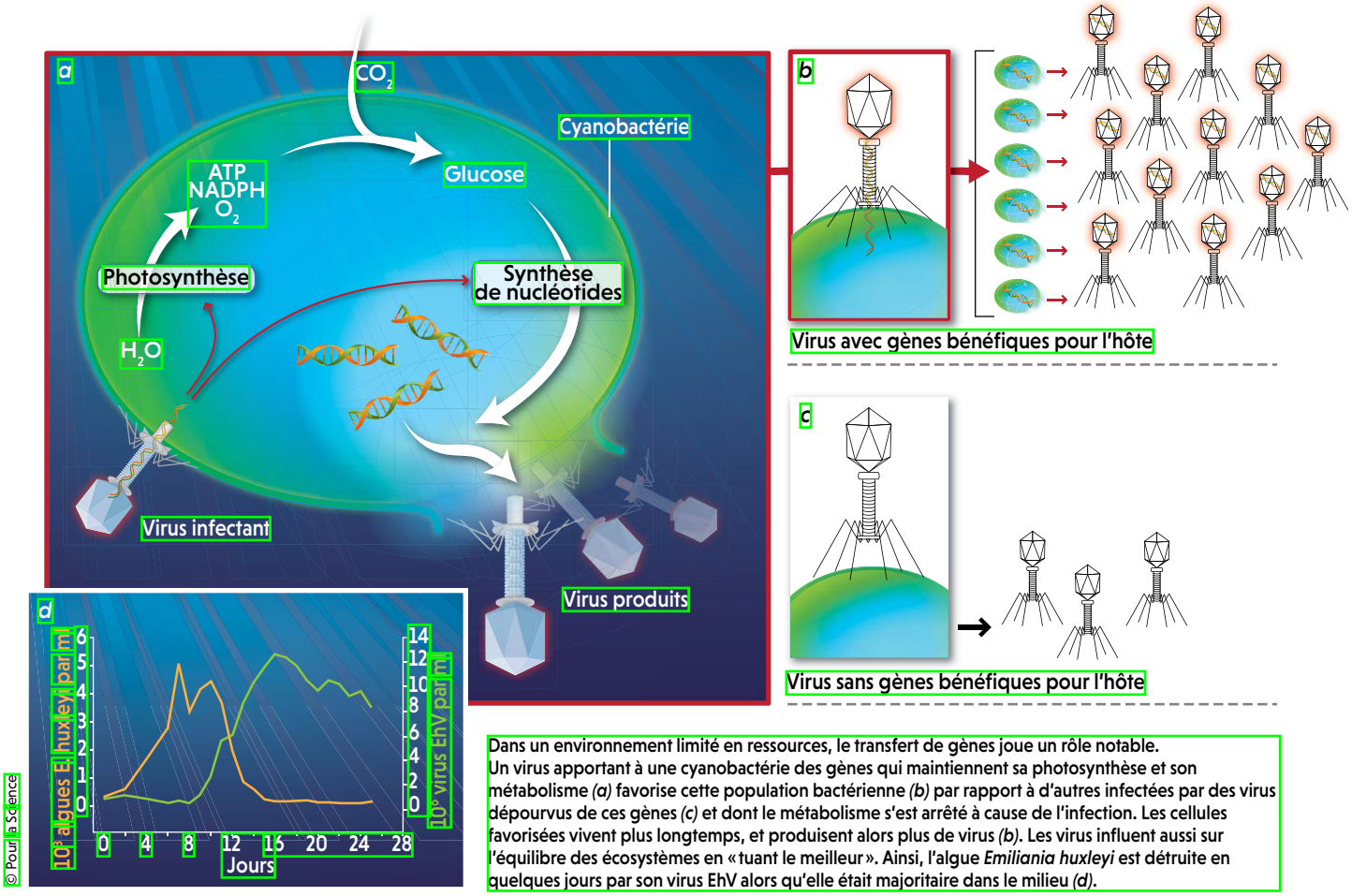
© IGS- CNRS/AMU

TRANSFERT DE GÈNES

Un autre mécanisme important par lequel la biodiversité virale influence le vivant est le transfert de gènes entre espèces. Un virus dormant dans un procaryote ou un eucaryote peut intégrer son matériel génétique dans celui de son hôte. Cette intégration confère au receveur de nouvelles propriétés, en général une plus grande résistance et une protection contre l'infection par d'autres virus, mais aussi des propriétés métaboliques, morphologiques, immunogénétiques, voire pathogènes inédites. C'est ainsi que la bactérie responsable du choléra, *Vibrio cholera*, a acquis sa toxicité grâce à un gène d'origine virale, tout comme *Corynebacterium diphteria* (diphtérie) et *Clostridium botulinum* (botulisme). De même, la syncytine, une protéine d'origine virale, semble indispensable à la formation du placenta des mammifères. Le transfert de gène a ici eu un effet positif.

En milieu aquatique, le transfert de gènes entre les cyanobactéries et leurs virus, les cyanophages, est particulièrement intéressant. Au fil de leur évolution, les cyanophages ont assimilé dans leur génome de nombreux gènes – probablement récupérés chez leurs hôtes – qui codent des composants clefs de l'appareil photosynthétique bactérien. Exprimés pendant l'infection, ces gènes assurent que la photosynthèse et d'autres fonctions de la cyanobactérie perdurent pendant la réplication des virus, alors que les protéines bactériennes dont c'était le rôle en temps normal sont devenues inopérantes. Le maintien de l'activité photosynthétique profite au phage: il peut continuer à utiliser la machinerie cellulaire de son hôte pour se répliquer jusqu'au dernier moment, lorsque la bactérie, gorgée de virus, explose.

Bien qu'aléatoire (il dépend de la rencontre d'un virus et de son hôte), ce processus est très répandu chez les procaryotes. En 1998, Sunny Jiang et John Paul, de l'université de Californie à Irvine, aux États-Unis, évaluaient à 10^{14} le nombre de transductions virales (transferts de gène) ayant lieu chaque année dans la seule baie de Tampa, le long du golfe du Mexique sur la côte Ouest de la Floride. Et en 2009, Forest Rohwer et Rebecca Vega-Thurber, de l'université d'État de San Diego, en Californie, avançaient le



© Pour la Science

Dans un environnement limité en ressources, le transfert de gènes joue un rôle notable. Un virus apportant à une cyanobactérie des gènes qui maintiennent sa photosynthèse et son métabolisme *(a)* favorise cette population bactérienne *(b)* par rapport à d'autres infectées par des virus dépourvus de ces gènes *(c)* et dont le métabolisme s'est arrêté à cause de l'infection. Les cellules favorisées vivent plus longtemps, et produisent alors plus de virus *(b)*. Les virus influent aussi sur l'équilibre des écosystèmes en « tuant le meilleur ». Ainsi, l'algue *Emiliania huxleyi* est détruite en quelques jours par son virus EhV alors qu'elle était majoritaire dans le milieu *(d)*.

nombre de 10^{24} pour l'ensemble des océans, selon une évaluation prenant en compte les concentrations bactériennes et virales connues, la probabilité de rencontre de l'hôte et du virus ou encore les conditions environnementales.

Ce mécanisme de transfert génétique n'est pas l'apanage des procaryotes. Il existe aussi, dans une moindre mesure, chez les eucaryotes. Les virophages semblent d'ailleurs aussi participer au transfert de matériel génétique chez ces organismes : *Mavirus*, le virus du virus *CroV* découvert en 2011, pourrait être à l'origine des transposons, ces fragments d'ADN capables de se déplacer et de se multiplier de façon autonome dans un génome eucaryote.

DES ABYSSES ENCORE INEXPLORÉS

Aujourd'hui, il n'est plus possible d'ignorer le rôle des virus dans les écosystèmes aquatiques. Par leurs activités régulatrices des populations, ou grâce à l'action indirecte de leurs gènes, les virus aquatiques, de par leur nombre et leur diversité, contribuent de façon essentielle à la biodiversité en augmentant la variabilité génétique des microorganismes. Ce faisant, ils participent à la régulation du fonctionnement écologique de la planète et à ses changements évolutifs. Ils prendraient même part à la régulation climatique : en recyclant la matière organique présente dans les océans, ils modifient le flux de carbone qui y transite, notamment son transfert vers le fond, et influent *in fine* sur la quantité de gaz carbonique que ces derniers absorbent ou rejettent dans l'atmosphère.

La compréhension de leur impact réel sur l'environnement et de leur rôle dans l'évolution du vivant n'en est qu'à ses débuts… de même que l'étude de leur diversité. Le volume des océans est tel que seule une infime proportion a été explorée à ce jour. Au-delà de 200 mètres de profondeur, les sous-marins scientifiques n'ont visité que l'équivalent de la région parisienne. Qu'y a-t-il dans les milliards de mètres cubes restant à explorer ? Près des sources froides d'où s'échappe le méthane, où des écosystèmes se constituent, ou dans les fumeurs chauds et noirs, des cheminées hydrothermales riches en sulfure d'hydrogène ? Ou encore près des coraux profonds que l'on commence à découvrir et des monts sous-marins inexplorés ? Et même dans les sédiments où les virus, prédateurs majeurs des grands fonds, s'accumulent aussi au fil du temps et restent actifs pendant des milliers d'années ? ■

BIBLIOGRAPHIE

A. GREGORY *ET AL.*, Marine DNA viral macro- and microdiversity from pole to pole, *Cell*, vol. 177, pp. 1-15, 2019.

R.-M. BARTHÉLÉMY *ET AL.*, Serendipitous discovery in a marine invertebrate (*Phylum Chaetognatha*) of the longest giant viruses reported till date, *Virology: Current Research*, 2019.

M. LEGENDRE *ET AL.*, Diversity and evolution of the emerging Pandoraviridae family, *Nature Communications*, vol. 9, Art. 2285, 2018.

L. JACQUEMOT *ET AL.*, Therapeutic Potential of a New Jumbo Phage That Infects Vibrio coralliilyticus, a Widespread Coral Pathogen, *Front. Microbiol.*, 02501, 2018.

M. VLOK *ET AL.*, Marine RNA virus quasispecies are distributed throughout the oceans, *mSphere*, vol. 4, e00157-19, 2018.

Les bactéries qui aimaient le plastique

Maria-Luiza Pedrotti explore le monde inconnu des bactéries mangeuses de plastique. Ces microorganismes abondent dans les vortex de déchets flottant à la surface des océans. Pourront-elles en venir à bout ?

La vue depuis la proue de la goélette *Tara* tandis qu'elle affronte les grands vents du Pacifique.

© Samuel Bendorff – Tara Expeditions Foundation

L'ESSENTIEL

- Le « continent de plastique » est surtout un vortex géant où s'accumulent les petits fragments de plastiques.
- Une riche communauté microbienne s'y développe, distincte de celle que l'on trouve ailleurs.
- Les bactéries présentes se caractérisent surtout par trois propriétés : elles fixent l'azote, échangent intensément des gènes et dégradent le plastique.
- Elles inquiètent les autorités sanitaires qui craignent la dissémination de résistances aux antibiotiques.
- Elles pourraient néanmoins aider à contenir la pollution par le plastique.

L'AUTEURE

ELIZABETH SVOBODA
Journaliste scientifique et écrivaine, elle contribue régulièrement à *Discover*, *Newsweek*, *Nautilus*, *Quanta*...

Au milieu de l'océan Pacifique, à quelques centaines de kilomètres de Hawaï, un tourbillon de plastique ne cesse de croître depuis les années 1980. Surnommé le « septième continent », ce vortex dit du Pacifique nord est le témoin monstrueux de la culture du jetable. Il est aussi, contre toute attente, un terrain de jeu pour de nombreux microorganismes.

À bord de la goélette *Tara*, l'océanographe Maria-Luiza Pedrotti, du CNRS, et ses collègues, traquent les mystérieux habitants de ce qu'elle nomme la « plastisphère ». Leur objectif : identifier les microbes de ce nouvel écosystème et comprendre leur biologie. Il s'agit d'apprendre comment ces organismes influent sur la chaîne alimentaire de l'océan en général et, par extension, la santé des hommes.

Les travaux de Maria-Luiza Pedrotti sur les microbes du vortex sont toujours en cours (*voir l'encadré, page 48*). Toutefois, ses études précédentes (sur les déchets en Méditerranée) avaient déjà révélé certaines particularités des microbes qui prospèrent sur les fragments de plastique.

CHOLÉRA ET AUTRES MENACES

Ceux du septième continent abritent de grandes quantités de bactéries du genre *Vibrio*, notamment l'agent responsable d'une maladie humaine tristement célèbre, le choléra. La plastisphère héberge d'autres dangers. En 2018, des chercheurs du *Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries*, en Allemagne, et d'ailleurs, ont révélé que les bactéries des microplastiques échangent très fréquemment des gènes. Cette activité accrue serait due à la vaste surface de croissance offerte aux microbes par les plastiques. Ces échanges génétiques rapides facilitent >

Le vortex de déchets du Pacifique nord n'est pas un « continent » solide, mais plutôt une soupe tourbillonnante de milliards de fragments de plastiques. Pour les étudier, des échantillons sont collectés par des filets Manta à maille fine *(à gauche)*. La taille des fragments *(à droite)* varie du micromètre au millimètre.

l'apparition et la diffusion de résistances aux antibiotiques qui, à terme, pourraient profiter à des agents infectieux humains.

De telles découvertes ont mis en alerte les experts en maladies infectieuses. On ne peut toutefois pas imaginer débarrasser l'océan de ses monceaux de déchets plastiques. En effet, nous ignorons encore à quel point la faune microbienne de ces zones et les chaînes trophiques de l'océan sont connectées : l'élimination de la plastisphère pourrait avoir des conséquences imprévues sur l'écosystème océanique global.

Ce n'est qu'une question rhétorique, car il est impossible de retirer ne serait-ce qu'une fraction significative de tout le plastique présent. De fait, la plus grande part de cette pollution est microscopique et ne peut pas être capturée.

Un espoir réside cependant au cœur même de la platisphère pour en contrer les pires effets. Des scientifiques français étudiant le vortex de déchets de l'Atlantique nord y ont découvert une concentration importante de microbes capables de digérer les plastiques pour produire leur propre énergie. Les recherches de Maria-Luiza Pedrotti confirment la présence de tels organismes. On pourrait alors exploiter ces microbes pour dégrader au moins une partie des détritus flottants.

Quanta magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par *Quanta Magazine*, une publication en ligne indépendante soutenue par la *Simons Foundation* afin de favoriser la diffusion des sciences : http://bit.ly/QM-Plastic

I HAD A DREAM...

La solution idéale est en amont. Elle consisterait à endiguer durablement le flot de déchets plastiques de manière à ne faire de la plastisphère qu'un bref épisode de l'histoire. « Je rêve que, dans plusieurs siècles, déclare Romain Troublé, directeur exécutif de la fondation Tara Océan, lorsque les géologues observeront les traces de cette couche de plastique, ils constateront qu'elle s'est arrêtée à l'an 2050. » Afin d'en savoir plus, nous avons rencontré Maria-Luiza Pedrotti à bord de *Tara*.

« On pourrait endiguer la pollution grâce à plusieurs espèces de bactéries »

Comment en êtes-vous venue à étudier les communautés microbiennes des vortex de plastique ?

Maria-Luiza Pedrotti : Pendant ma thèse, j'ai travaillé sur la dispersion des larves d'oursins. J'ai ensuite étudié la diversité bactérienne dans divers agrégats, notamment sur des fibres issues d'installations de traitement des déchets. En 2014, j'ai coordonné une expédition qui s'intéressait au plastique. Quand Romain Troublé, de la fondation Tara, m'a proposé de la faire sur *Tara*, j'ai tout de suite dit « Oui ! ».

Comment les échantillons sont-ils collectés et analysés ?

Maria-Luiza Pedrotti : Avec un filet de type Manta, à maille fine, que le navire traîne, nous recueillons tous les fragments dont la taille est supérieure à 300 micromètres. Pendant la collecte, nous avançons à seulement trois nœuds, car nous avons besoin de conditions calmes.

Nous avons déployé des filets dans le vortex du Pacifique Nord en juin et juillet 2018 pour des analyses génomiques, pour évaluer la distribution spatiale des fragments et enfin pour identifier la biodiversité associée au plastique. Nous faisions jusqu'à cinq prélèvements par jour : nous passions donc notre temps à cela ! Pour trente minutes passées dans l'eau, un filet retenait jusqu'à 500 fragments de plastique. C'est beaucoup !

Nous séquençons deux molécules (les ARN ribosomaux 16S et 18S qui aident à reconstruire l'histoire évolutive des organismes) de certaines bactéries, tandis qu'avec le Genoscope (le centre national français de séquençage), nous réalisons une analyse métagénomique. Nous obtenons ainsi un aperçu complet des communautés de microbes libres et de celles qui sont associées aux agrégats de plastique. Nous pourrons mieux comprendre la dispersion des espèces invasives, toxiques et pathogènes.

Nous analysons également des échantillons du vortex du Pacifique Nord pour déterminer la proportion de plastique par rapport au plancton, une sorte d'indicateur de l'état de l'environnement. Quand le plastique est majoritaire, les poissons meurent, car ils ingurgitent surtout ces microdéchets. Selon de précédentes

À bord de la goélette *Tara*, l'océanographe Maria-Luiza Pedrotti prépare son équipement. Elle dirige les travaux sur les communautés microbiennes qui se développent sur les fragments de plastique du vortex de l'océan Pacifique Nord.

© Samuel Bollendorff – Tara Expeditions Foundation

études, on trouve six kilogrammes de plastique pour chaque kilogramme de plancton…

À quoi ressemble vraiment ce vortex de plastique du Pacifique Nord ?

Maria-Luiza Pedrotti : Ce n'est pas une île que vous pouvez simplement nettoyer avec des navires. Il s'agit en fait d'une grande quantité de microplastiques étalée sur une vaste zone où la concentration de plancton est très basse. Les publications évoquent la présence de macroplastiques (d'une taille typiquement supérieure à cinq millimètres), mais nous y avons principalement trouvé des microplastiques, ainsi que quelques rares gros objets.

Un échantillon est difficile à décrire. Nous parlons de « soupe », mais c'est une « soupe appauvrie », riche en plastique et pauvre en plancton.

En quoi la communauté microbienne des vortex de plastique se distingue-t-elle ?

Maria-Luiza Pedrotti : Les communautés de microbes que l'on trouve sur les plastiques diffèrent des bactéries libres par leurs caractéristiques physiques et chimiques. Elles sont opportunistes. Sans substrat, les bactéries restent en dormance pendant longtemps. Mais une fois accrochées, par exemple à un morceau de plastique, elles se développent aussitôt. En Méditerranée, nous avons trouvé beaucoup de cyanobactéries benthiques sur les plastiques. Ces organismes filamenteux vivent souvent dans les profondeurs et s'adaptent à des environnements divers et à des concentrations de nutriments très différentes grâce à leur capacité à fixer l'azote.

Les microbes trouvés sur les plastiques fixent l'azote, échangent des gènes et dégradent les polymères

En Méditerranée, nous avons aussi découvert que les espèces principales de bactéries sur les plastiques sont spécialisées dans la dégradation d'hydrocarbures. Elles décomposent les polymères en monomères dont elles utilisent le carbone pour produire de l'énergie. Le plus souvent, les microbes trouvés sur les plastiques fixent l'azote, échangent des gènes et dégradent le plastique.

Certains organismes pathogènes sont également associés au plastique, nous allons donc les rechercher. Des collègues avaient trouvé des bactéries du genre *Vibrio* (un groupe qui comprend les bactéries responsables du choléra) dans l'Atlantique Nord où elles étaient associées à des microplastiques. La plupart des bactéries marines sont inoffensives, mais

DU PLANCTON AU PLASTIQUE

C'est en 2010, au cours de *Tara Oceans 2009-2013*, l'expédition dédiée au monde planctonique, que Tara s'est intéressée au stock de plastique en mer. Nous avons commencé à prélever des microplastiques dans des filets et ouvert une importante page de la recherche fondamentale sur les interactions entre le plastique et les organismes qui forment la base de la chaîne alimentaire marine : le plancton. En Arctique, Tara a identifié une importante zone d'accumulation de microplastiques dans des régions vierges et isolées. L'étude publiée en 2017 dans *Science Advances* met en évidence le transport à grande échelle de débris de plastique flottants depuis l'océan Atlantique jusqu'à l'Arctique par le courant du Gulf stream et confirme qu'en seulement quelques décennies d'utilisation de matières plastiques, la pollution marine résultante s'est dispersée largement. En 2014, l'expédition *Tara Méditerranée* coordonnée par deux chercheurs CNRS, dont Maria-Luiza Pedrotti, et Stéphane Bruzaud, de l'université de Bretagne Sud, était entièrement dédiée à la compréhension des impacts du plastique sur l'écosystème méditerranéen.

Des micro-écosystèmes (bactéries, microalgues, microprédateurs…) se développent à la surface du plastique

La mission a quantifié les fragments de plastique, leur taille, leur poids et la composition chimique de ces fragments… un travail de fourmi sur près de 70 000 fragments ! L'équipe a aussi étudié la faune et la flore associée aux plastiques.
Les premiers résultats font apparaître une concentration moyenne de microplastiques de surface en Méditerranée équivalente à celle observée dans le continent de plastique du Pacifique Nord. Des zones côtières à forte concentration de plastique ont été repérées près de Naples, de la Corse et de Marseille. Plusieurs liens entre plastique et organismes vivants ont été mis en évidence. Ainsi, le plastique est d'autant plus incorporé dans les chaînes alimentaires qu'il est abondant. Les communautés de plancton sont spécifiques des différents types de plastiques. De véritables écosystèmes microscopiques avec des bactéries,

> plusieurs taxons peuvent causer des maladies chez les humains et les animaux.

Dans quelle mesure le vortex du Pacifique Nord est-il comparable à celui de la Méditerranée ?

Maria-Luiza Pedrotti : Nous comparons le système méditerranéen à celui du Pacifique pour voir si les bactéries s'y attachent de la même façon au plastique. Les mécanismes sont-ils communs ou spécifiques à chaque zone ?

Dans la Méditerranée, la diversité des bactéries sur les plastiques est supérieure à celle des bactéries libres. C'est très intéressant et cela soulève de nombreuses questions. Comment expliquer cette surabondance ? Peut-être parce que les bactéries sont spécialisées pour certains types de substrats, comme justement le plastique. Un de mes collègues, un étudiant, a montré que les biofilms bactériens naissent plus facilement sur le plastique dégradé que sur de la matière récemment jetée à l'eau.

Comment les microbes des vortex interagissent-ils avec le reste de la chaîne alimentaire océanique ? Ces changements peuvent-ils affecter les humains ?

Maria-Luiza Pedrotti : Le système de la plastisphère abrite des espèces microbiennes toxiques, nous l'avons vu. Or on trouve beaucoup de ces plastiques dans les huîtres et les moules, qui sont des organismes suspensivores (les animaux aquatiques qui se nourrissent en filtrant de petits organismes comme le krill). Si vous mangez des huîtres qui contiennent des microbes pathogènes, le transfert est direct.

Autre menace : les poissons ne peuvent pas faire la différence et l'ingestion du plastique va les affamer, ce qui va ensuite impacter toute la chaîne alimentaire. Tout est connecté.

Sur les côtes, ramasser des déchets plastiques les empêche d'atteindre le plein océan

En 2018, on a découvert que les microplastiques sont propices à l'apparition de résistances aux antibiotiques. Comment cela peut-il affecter le reste de l'écosystème ?

Maria-Luiza Pedrotti : Des chercheurs allemands ont comparé le transfert de gènes entre des bactéries libres et d'autres associées à des

A bord de *Tara*, Mélanie Billaud et Nils Haentjens inspectent le contenu en fragments de plastique d'un échantillon d'eau de mer.

des microalgues et des microprédateurs se développent à la surface de ces fragments. Parmi ces plastiques, on observe une forte prépondérance des polymères utilisés pour les emballages à usage unique, ainsi que d'importantes concentrations de fibres synthétiques colonisées par des bactéries.

Ces travaux ont été prolongés sur tout le parcours de l'expédition *Tara Pacific 2016-18*, dédiée aux récifs coralliens, y compris dans le continent de plastique du Pacifique Nord. Aujourd'hui, la fondation Tara Océan s'intéresse au plastique à travers une nouvelle mission aux embouchures des fleuves européens, entre terre et mer cette fois, afin d'explorer et décrire les fuites de déchets plastiques vers la mer. Cette «mission microplastiques 2019», dont le volet scientifique est coordonné par le CNRS, sillonnera plusieurs façades de l'Europe pendant six mois et explorera 10 grands fleuves. Elle se déroule jusqu'au 23 novembre 2019. Elle a pour objectifs majeurs d'identifier les sources de pollution, de comprendre leur fragmentation dans les fleuves et de prédire leur dispersion vers l'océan mais aussi de marteler que les solutions pour stopper ce fléau sont à terre, et qu'elles impliquent toute la société.

FONDATION TARA OCÉAN

microfragments de plastiques. Il est notablement plus important dans le second cas. Qui plus est, il a souvent lieu entre des espèces différentes. De tels échanges, rapides et nombreux, favorisent l'adaptation des microbes (un processus d'ordinaire très long) à un nouvel environnement et la propagation de phénomènes de résistances aux antibiotiques.

Les risques pour la santé humaine sont importants! Si vous vivez au Bangladesh, par exemple, et que ces plastiques porteurs de bactéries résistantes atteignent les rivières à partir des océans, une grave épidémie pourrait se déclencher.

Est-il envisageable un jour de pouvoir nettoyer ces vortex de déchets?

Maria-Luiza Pedrotti: Selon moi, et en considérant l'ampleur du phénomène, c'est impossible. Nous ne pouvons simplement pas collecter les microplastiques et être efficaces sur de vastes zones. Même le plastique biodégradable n'est pas bon pour les océans, car il ne s'y décompose pas correctement. Bannir l'usage de sachets plastiques et les remplacer par des matériaux biodégradables ne fonctionnerait pas.

Il n'existe pas de méthode magique pour nettoyer les océans. Toutefois, le ramassage local, sur les zones côtières, est une bonne solution à préconiser, puisqu'il empêche les déchets plastiques d'atteindre l'écosystème océanique global.

Les microbes des vortex peuvent-ils nous enseigner de nouveaux moyens de dégrader les déchets?

Maria-Luiza Pedrotti: On pourrait au moins endiguer la pollution par le plastique. Plusieurs espèces de bactéries et de champignons dégradent efficacement le polyéthylène, le polypropylène et d'autres polymères. Pour ce faire, ces microorganismes utilisent des enzymes qui les découpent en monomères.

Que prévoyez-vous d'étudier dans les années à venir?

Maria-Luiza Pedrotti: Les plastiques peuvent faciliter la colonisation bactérienne et être le vecteur de potentiels envahisseurs comme des algues nocives et des agents pathogènes. La première étape consiste à comprendre les mécanismes sous-jacents. La seconde consiste à essayer de cultiver les organismes qui se lient au plastique.

Nous devons continuer nos recherches. Le milieu des études sur les communautés microbiennes associées au plastique est lacunaire; nous ne comprenons pas encore exactement comment ces organismes affectent l'écologie océanique globale. Pour être crédible, nous devons avant tout rester humble. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. LUIZA PEDROTTI *ET AL.*, Changes in the floating plastic pollution of the Mediterranean sea in relation to the distance to land, *Plos one*, vol. 11(8), e0161581, 2018.

M. ARIAS-ANDRES *ET AL.*, Microplastic pollution increases gene exchange in aquatic ecosystems, *Environmental Pollution* vol. 237, pp. 253-261, 2018.

D. DEBROAS *ET AL.*, Plastics in the North Atlantic garbage patch: A boat-microbe for hitchhikers and plastic degraders, *Science of The Total Environment*, vol. 599-600, pp. 1222-1232, 2017.

© Samuel Bollendorff – Tara Expeditions Foundation

Dans cette image se cachent peut-être les médicaments de demain

© Richard Whitcombe/shutterstock.com

VEILLER AU GRAIN

L'humanité aurait-elle pris conscience des dommages que ses activités infligent aux océans ? Peut-être… En tout cas, les initiatives pour réparer les dégâts se multiplient. Ici, on élève du corail pour espérer un jour recoloniser des récifs chatoyants de couleurs. Là, on délimite des aires protégées pour que la biodiversité se reconstitue, sans négliger les aspects socioéconomiques. Là encore, on organise la protection des tortues pour éviter leur disparition annoncée. Et au plus haut niveau des instances internationales, on réfléchit aux meilleures mesures à prendre pour protéger durablement les 71 % de la planète. Au-delà de la préservation de la nature, c'est également mettre toutes les chances de notre côté quant aux ressources que la mer recèle : médicaments, nourriture, nouveaux matériaux…

Des pouponnières pour le corail

Le réchauffement océanique menace les coraux. Peut-on sauver ces animaux en les cultivant ?

© Avec la nable autorisation de theoceanagency.org

L'ESSENTIEL

- Des biologistes essayent plusieurs méthodes pour aider les coraux à s'adapter au réchauffement climatique.
- Ils les poussent à se cloner plus vite et créent des larves en laboratoire pour accroître leur diversité génétique.
- Un stress thermique favorise l'activation de gènes qui conduisent à des descendants plus résilients ; la stimulation des algues symbiotiques des coraux pourrait aussi renforcer leur santé.
- Ces techniques sont prometteuses à l'échelle locale, mais un sauvetage à l'échelle mondiale ne sera possible que si nous ralentissons le réchauffement océanique.

L'AUTEURE

REBECCA ALBRIGHT
spécialiste des coraux, est conservatrice à l'Académie des sciences de Californie.

Un plongeur contrôle des coraux plantés dans une baie, à Hawaï, pour déterminer comment l'acidification des océans, due au changement climatique, les affecte.

Debout sur une plage australienne, je me prépare à plonger sur la Grande Barrière de corail, 10 ans après ma précédente plongée en ce lieu. Mon émotion avait été à la hauteur du chemin parcouru : élevée dans l'Ohio, j'avais passé mon enfance à lire des livres sur la biologie marine. J'avais passé mes niveaux de plongée dans les eaux troubles des carrières de calcaire de cet État, avant de partir, un an plus tard, explorer la Grande Barrière. Avec mon amie Émilie, nous avions passé deux merveilleuses heures durant lesquelles, fascinées, nous contemplâmes une prospère forêt de corail regorgeant de seiches, de bénitiers géants violets et de gracieuses tortues marines…

Et me voilà de retour, cette fois en tant que chercheuse à l'Institut australien des sciences marines situé à Cape Ferguson dans le Queensland. Prête à m'émerveiller à nouveau, j'entre dans l'eau, puis regarde. Mon cœur se serre : plus aucune seiche, plus de tortues non plus… Le corail est pâle. La vie foisonnante a cédé la place aux algues et aux sédiments… Ce choc date de 2014, alors que commençait le troisième grand épisode de blanchiment.

Les coraux sont de petits animaux, des polypes, sécrétant un exosquelette en calcaire (le matériau du récif) et vivant en symbiose avec des zooxanthelles, des microalgues qui leur fournissent la majeure partie de leur nourriture et leur confèrent leurs couleurs. Quand l'élévation de la température des eaux marines stresse les coraux, ils tendent à expulser leurs microalgues. Leurs colonies perdent alors leurs couleurs pour adopter celle du calcaire constitutif de l'exosquelette des polypes : elles blanchissent.

Les plongeurs fixent des coraux élevés en laboratoire afin de repeupler un récif, un peu comme on plante de jeunes arbres pour reconstituer une forêt.

UNE KYRIELLE DE MENACES

Le blanchiment massif des coraux entamé en 2014 a duré trois ans, dévastant les récifs sur toute la planète. Même si la surpêche, la pollution et l'acidification des océans menacent aussi les récifs coralliens, la principale inquiétude à leur propos aujourd'hui est bien leur destruction rapide et massive par le réchauffement des eaux océaniques.

Provoquées par des épisodes El Niño, les premières grandes phases de blanchiment se sont produites en 1998 et en 2008. Celle de 2014 à 2017 a de loin été la plus longue et la plus ample puisqu'elle a concerné pas moins de 70% des récifs coralliens du monde. Deux tiers des coraux de la Grande Barrière de corail ont été soit sévèrement blanchis, soit détruits. Et la dévastation continue : les récifs coralliens disparaissent sous nos yeux. Au cours des 30 dernières années, nous avons perdu approximativement 50% des coraux de la planète et les chercheurs estiment que pas plus de 10% des coraux du monde survivront jusqu'en 2050. Nous avons besoin de solutions pour les sauver et il nous les faut très vite !

LES CORAUX DANS L'ANTHROPOCÈNE

Au cours des 40 dernières années, l'intervalle de temps séparant deux événements de blanchiment a été divisé par cinq. C'est la constatation à laquelle l'équipe de Terry Hughes de l'université James Cook en Australie est parvenue après avoir examiné de près les évolutions de cent récifs coralliens situés dans les eaux territoriales de 54 pays à travers le monde. Selon les chercheurs, il est clair que les coraux sont entrés dans l'ère géologique dite de l'Anthropocène, c'est-à-dire de la domination de la vie sur Terre par l'humanité.

© Avec la timable autorisation de Joe Berg Way Down Video

Même si les récifs coralliens ne couvrent que 0,1% de la surface du fond océanique, on y rencontre 25% des espèces marines connues, dont certaines nourrissent des millions de gens. Ils représentent aussi des protections côtières naturelles capables d'atténuer jusqu'à 97% de l'énergie des vagues et 84% de leur hauteur. Et puis, les coraux sont aussi à l'origine d'une activité touristique. S'ils venaient à disparaître, les vies de quelque 500 millions de personnes seraient compromises, entraînant un manque à gagner de plus de 30 milliards d'euros.

DES SAPINS DE NOËL IMMERGÉS

Poussés par l'urgence de la situation, des chercheurs se sont mis à développer des moyens de plus en plus audacieux et créatifs pour maintenir les récifs coralliens et les restaurer. Les techniques nécessaires doivent être bon marché et adaptables à grande échelle. Ces critères ont conduit à une poignée d'options fondées sur des processus naturels et des interventions humaines. Ensemble, ces actions pourraient aider les coraux à traverser les prochaines décennies – et atteindre, espérons-le, une période où l'humanité aura assez réduit ses émissions pour que le réchauffement climatique ralentisse.

Si vous plongez un jour à quelque sept kilomètres de la côte de Floride, peut-être tomberez-vous sur des forêts d'arbres en plastique aux branches ornées de coraux, semblables à des sapins de Noël décorés. Les chercheurs emploient de tels élevages en mer ou en bassin afin de cultiver des coraux qui, ensuite, seront transplantés sur des récifs dégradés. Ces pouponnières marines tirent parti du fait que la reproduction des coraux peut être sexuée ou non. Une colonie corallienne est en effet un organisme clonal constitué de centaines de milliers de polypes qui sont les clones les uns des autres. Chacun a la capacité de se reproduire de façon sexuée en émettant des œufs et du sperme qui fusionneront pour former des larves et de façon asexuée par bourgeonnement de ses polypes pour en former d'autres (*voir l'encadré page 57*).

Quand une tempête endommage un récif corallien, il arrive qu'un fragment de colonie se détache, soit emporté, se fixe au fond et recommence à prospérer en se clonant. C'est pourquoi les éleveurs de corail fragmentent volontairement des coraux afin d'en créer des clones. Aujourd'hui, presque 90 espèces différentes sont élevées à travers le monde. Les éleveurs des Caraïbes et de l'Atlantique occidental font couramment pousser des dizaines de milliers de coraux et les transplantent sur des récifs dégradés, financés le plus souvent par des donateurs privés, des subventions ou des programmes gouvernementaux de restauration.

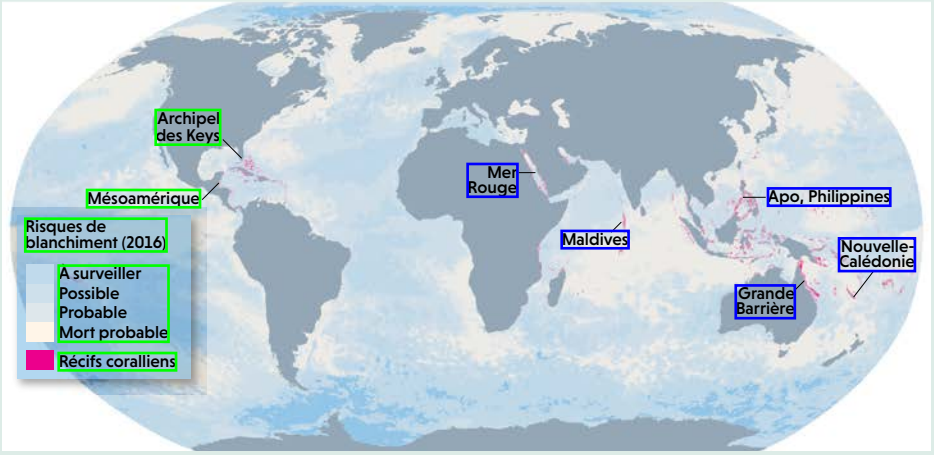
Les chercheurs aimeraient amplifier ce type de restauration. Dave Vaughan, du laboratoire marin Mote, à Sarasota, en Floride, a découvert récemment que lorsqu'on réduit les coraux en fragments de la taille d'une gomme, ils se régénèrent 25 à 50 fois plus vite que dans la nature. Et si des morceaux génétiquement équivalents sont disposés à quelques centimètres les uns des autres, ils fusionnent à nouveau pour former une grande colonie. En quelques mois, l'équipe de Dave Vaughan obtient ainsi des colonies coralliennes de la taille d'un ballon de football, ce qui, dans la nature, aurait pris des années.

600 CORAUX EN UN APRÈS-MIDI

Il y a douze ans, aux débuts de la culture corallienne, l'équipe de Dave Vaughan a produit 600 coraux en six ans; elle en fait aujourd'hui autant... en un après-midi. Entre-temps, elle a appliqué avec succès sa technique de fragmentation à une demi-douzaine d'espèces coralliennes. Dave Vaughan prévoit de produire et de transplanter jusqu'à 100000 en 2019, et il s'est juré de ne pas prendre sa retraite avant d'en avoir transplanté 1 million.

LE PIRE BLANCHIMENT DE TOUS LES TEMPS

Entre 2014 et 2017, un échauffement anormal des eaux océaniques a provoqué le blanchiment de coraux de la plus grande ampleur jamais enregistrée. Au cours de l'année 2016, en effet, les conditions de vie difficiles pour les coraux dues à cette élévation de température se sont multipliées sur la planète. Stressés, les polypes coralliens ont expulsé en masse leurs algues symbiotiques, ce qui a privé les colonies coralliennes de leur source de nourriture, dans nombre de cas jusqu'à la mort.



Source: NOAA Satellite and Information service / Carte réalisée par Mapping Specialists

© Getty Images

Quand il a commencé dans la culture de coraux, la production d'un seul corail coûtait quelque 800 euros. Grâce à la technique de fragmentation et après avoir amélioré ses méthodes, son équipe produit aujourd'hui couramment un corail pour moins de 17 euros. En faisant appel à des scientifiques amateurs et à des volontaires, Dave Vaughan est convaincu qu'il réduira ce coût à deux euros par corail – un euro pour assurer la reproduction et un autre pour financer la transplantation. Même si le Service américain de la pêche maritime estime que restaurer les coraux «corne de cerf» et «corne d'élan» typiques des Caraïbes demandera... 400 ans et 216 millions d'euros, l'objectif de Dave Vaughan est de les retirer de la liste des espèces en danger avant sa mort.

Ses techniques ont permis de rétablir de nombreux récifs tels qu'on les avait connus en termes de taille et de fonctionnement. Cela n'a toutefois été possible que localement : les mêmes résultats à l'échelle de l'écosystème signifieraient un saut énorme. De fait, la plupart des campagnes menées jusqu'à présent ont restauré moins de un hectare, alors que les récifs se dégradent sur des centaines de milliers de kilomètres carrés. Le passage à grande échelle est donc l'un des plus grands défis à relever : on a par exemple estimé que la restauration des 2300 kilomètres de la Grande Barrière à l'aide de fragments de corail à quatre euros pièce coûterait... 170 milliards d'euros.

Parallèlement à ces pouponnières fondées sur la reproduction asexuée des coraux, des chercheurs tentent de favoriser leur reproduction sexuée dans l'espoir d'augmenter leur diversité génétique. C'est important, car la baisse de diversité génétique accompagnant le déclin des populations réduit la résilience des colonies coralliennes face au réchauffement des eaux marines. Dans de nombreux récifs des Caraïbes, par exemple, un unique clone domine. Or la science et même l'histoire enseignent qu'une diversité génétique trop faible conduit vite une population au désastre, particulièrement quand les conditions environnementales changent.

Les coraux du genre *Acropora* se reproduisent une fois par an en été. Tout au long des milliers de kilomètres de la Grande Barrière de corail, ils émettent alors des paquets de spermatozoïdes et d'ovules.

La reproduction sexuée est le moyen par lequel la nature accumule de la diversité. Comme les coraux sont fixés au plancher de l'océan, ils ne peuvent se déplacer à la recherche de partenaires. Pour se reproduire de façon sexuée, la plupart libèrent des ovules et des spermatozoïdes dans la colonne d'eau où, avec un peu de chance, des fécondations se produisent. Un phénomène qui devient de plus en plus improbable à mesure qu'une zone récifale se dégrade puisque les coraux vivants se retrouvent de plus en plus éloignés les uns des autres.

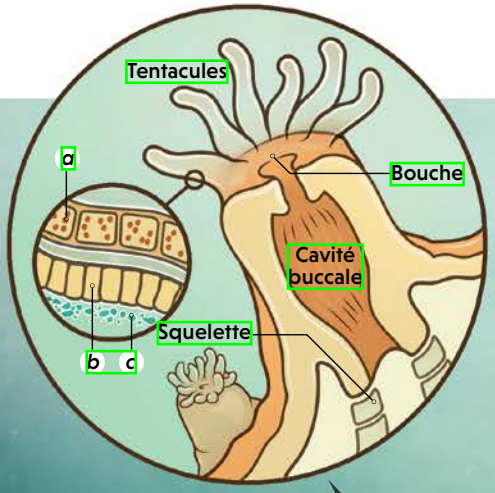
À l'Académie des sciences de Californie, en collaboration avec les ONG *Nature Conservancy* et *Secore International*, nous travaillons à assister la délicate sexualité des coraux. Nous avons désormais une bonne idée du moment pendant lequel frayent les colonies (*voir la figure ci-dessus*) : vers la fin de l'été, après le coucher du soleil et à la pleine lune (les coraux sont étonnamment romantiques). Au cours d'une des nuits où cela se produit, nous plongeons munis de filets afin de prélever les gamètes (*voir la figure ci-dessous*). Nous les apportons ensuite au laboratoire, où nous les mélangeons dans des seaux d'eau de mer afin de déclencher des fécondations. Les larves ainsi produites ont la taille d'un grain de sésame.

FIV CORALLIENNE

Dans la nature, tant qu'elles n'ont pas eu l'occasion de se fixer afin de commencer à croître, elles sont vulnérables, susceptibles d'être mangées à tout moment. D'où l'intérêt de les élever jusqu'à ce qu'elles soient assez grandes et fortes pour être transplantées sur le récif. L'objectif n'est pas de replanter des récifs entiers, mais plutôt d'y augmenter la diversité génétique tout en reconstituant assez la population afin que le récif puisse se rétablir par

Les spermatozoïdes et les ovules des coraux «corne d'élan» sont prélevés sous l'eau à l'aide d'un entonnoir en tissu et collectés dans un tube *(ci-contre)*.

© Avec l'aimable autorisation de Paul Selvaggio Secore International



ASSISTER LA VIE CORALLIENNE

Mi-animaux, mi-végétaux, les coraux produisent leur descendance en se clonant (reproduction asexuée) ou par la fusion d'un ovule et d'un spermatozoïde (reproduction sexuée) ; ils vivent aussi en symbiose avec des algues. D'où les quatre méthodes pour les aider à se multiplier et à prospérer présentées ci-dessous.

TROIS EN UN
Un corail est fait de nombreux polypes dotés d'un squelette et d'une bouche. Chacun est nourri par des algues *(a)* vivant sous un épiderme *(b)* entretenu par des bactéries *(c)*. Ces trois organismes symbiotiques bénéficient les uns des autres. Ce sont les algues qui donnent leurs couleurs aux coraux.

Larve
Polype
Fertilisation
Frayage

REPRODUCTION SEXUEE
Une nuit par an, une colonie corallienne libère des millions de minuscules billes translucides qui contiennent ovules et spermatozoïdes. Les billes remontent à la surface où leur membrane se dissout au contact de l'air. Si un spermatozoïde rencontre un ovule, la minuscule larve issue de la fécondation grossit, nage vers les fonds sous-marins, se fixe sur un substrat et devient un polype capable de bourgeonner.

Polype cloné
Fragmentation
Bourgeonnement
Colonie corallienne

REPRODUCTION ASEXUEE
Un polype se clone lui-même en formant un bourgeon qui se développe en un second polype identique au premier. En outre, si de fortes vagues brisent une branche du corail, les fragments peuvent se fixer au sol, pousser et devenir des copies conformes de l'organisme de départ.

Quelles solutions ?

ALGUES
Développer des algues résistantes à la chaleur et les inoculer aux bébés coraux afin de les rendre plus résistants à la chaleur.

FÉCONDATION CROISÉE
Prélever spermatozoïdes et ovules et les fusionner au laboratoire afin d'obtenir une grande diversité génétique de larves, puis les planter sur le récif afin de le rendre plus résilient.

GÈNES
Stresser thermiquement les coraux favoriserait l'activation de gènes de résistance thermique. Une fois dans un récif, les coraux entraînés transmettraient leur résilience.

MICROFRAGMENTS
Briser des coraux en petits morceaux, ce qui favorise la croissance de clones. En planter des milliers sur les récifs dégradés afin qu'ils se reconnectent en colonies.

© Rebecca Konte

lui-même tout en devenant plus résilient aux changements de l'environnement.

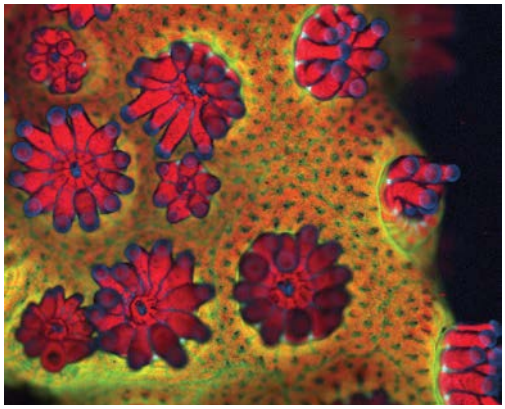
Nombre de récifs ont une trop faible diversité génétique pour produire des bébés coraux. En combinant multiplication asexuée et sexuée, nous serions à même de reconstruire des récifs sains dans le voisinage. L'objectif est de créer des coraux propagateurs de vie.

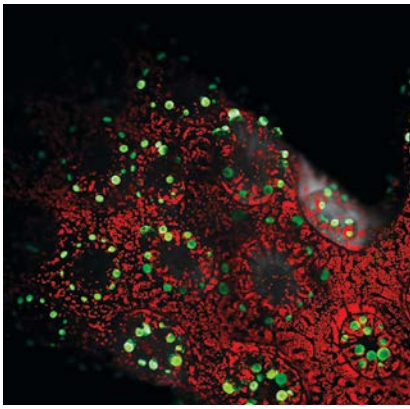
Dans la nature, environ un bébé corail sur 1 million survit. D'où le grand intérêt de les aider à traverser les premiers stades de leur vie. Nous en sommes aujourd'hui à 100% de succès dans la fécondation des coraux en laboratoire et la fixation des larves sur des tuiles pouvant être placées en mer. Lors d'un frai corallien à Curaçao dans les Caraïbes l'an passé, j'ai aidé *Secore International* à récolter les ovules de 25 colonies. En deux petites journées, notre équipe en a ramassé pas moins de 5 millions.

L'un des grands défis est de maintenir les coraux juvéniles en vie une fois réimplantés dans l'océan. Après tout, les conditions de vie qui y règnent actuellement sont la cause principale du déclin corallien, de sorte que tant que nous n'avons pas maîtrisé le changement climatique, la pollution et la surpêche, nous ne faisons qu'accorder un peu de répit aux coraux. Qui sait, peut-être réussirons-nous à créer des génotypes que nous reproduirons en masse et dont certains survivront.

Toutefois, pour qu'un tel scénario se produise, nous ne pouvons nous fier à la chance. Les conditions régnant dans les océans changent trop vite pour que la plupart des coraux s'adaptent naturellement, de sorte que les chercheurs s'intéressent aussi aux moyens d'accélérer leur adaptation. Une approche possible consiste à renforcer les traits favorisant la tolérance au stress thermique et la capacité à se rétablir après une phase de blanchiment. Cette évolution «assistée» est déjà très présente dans notre quotidien, puisque la plus grande partie de la nourriture que nous consommons provient d'espèces ayant été modifiées par l'humanité. Nos animaux de compagnie ont aussi été élevés et sélectionnés en fonction de traits esthétiques ou de personnalité. Dès lors, pourquoi ne pas en faire autant avec les coraux afin de favoriser leur résistance au changement climatique ?

Ruth Gates, de l'Institut de biologie marine de Hawaï, et Madeleine van Oppen, de l'Institut australien de science marine, travaillent ensemble à augmenter la résistance corallienne au stress. Afin de conditionner les coraux, Ruth Gates les place sur ce qu'elle nomme des «tapis roulants environnementaux». Ils y sont exposés à des températures sublétales, dans l'espoir de favoriser l'activation de gènes aidant à affronter durablement le stress thermique. Cette technique, nommée réglage épigénétique, serait plus enthousiasmante encore si les





coraux entraînés étaient ensuite implantés sur des récifs, où ils transmettraient leur résistance à leurs rejetons, créant en quelque sorte des générations de «supercoraux». Le réglage épigénétique augmenterait la résistance corallienne au blanchiment. En théorie du moins.

De fait, nous comprenons encore peu ce processus. Si les premiers essais de laboratoire sont prometteurs, il reste à en mener en mer. Ils révéleront si les coraux entraînés transmettent effectivement leur résilience à leurs descendants une fois intégrés à un récif, ce qui permettra d'envisager cette approche à plus grande échelle, d'étudier son coût et d'éventuels risques inhérents.

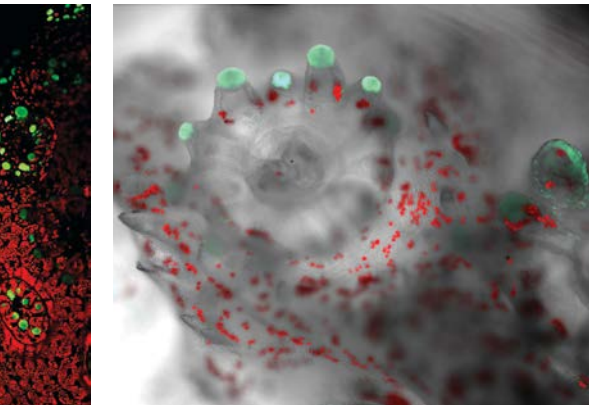
DE L'IMPORTANCE DU MICROBIOTE

Madeleine van Oppen, quant à elle, étudie la sélection artificielle. Un certain degré de diversité génétique existant au sein d'une même espèce, chaque individu est plus ou moins résistant au blanchiment ou à la maladie. Comme des sélectionneurs cherchant à favoriser certains traits d'une espèce animale, il serait intéressant d'identifier les colonies de coraux résistantes et de s'en servir pour produire une progéniture résistante. Nous serions alors en mesure d'améliorer la tolérance à la température d'un récif entier puisque les gènes utiles seraient transmis aux générations suivantes.

Sélectionner des coraux est difficile car leur maturation nécessite parfois une décennie. L'adaptation aux changements environnementaux est compliquée pour la même raison. Toutefois les microorganismes et les algues vivant en symbiose avec les coraux se reproduisent vite et influencent énormément leur santé. Nous tentons donc de manipuler ce microbiote corallien afin d'améliorer la santé des polypes.

Madeleine van Oppen développe actuellement en laboratoire des souches d'algues et les inocule à des bébés coraux afin qu'elles leur confèrent une tolérance thermique. Avec Ruth Gates, elle tente aussi d'appliquer plusieurs de ces techniques (réglage épigénétique, sélection

© Avec l'aimable autorisation d'Amy Eggers (en haut) d'Amy Eggers, Katie Barott et Mindy Mzobe (au milieu et en bas)



Ces algues *(en rouge)* nourrissent un corail du genre *Pocillopora* en bonne santé *(à gauche)*. Le réchauffement de l'eau conduit à leur expulsion *(au centre)* de sorte que le corail adopte la couleur de son exosquelette : il blanchit *(à droite)*. Une fois séparés de leurs algues, les coraux manquent de sucres *(les points verts sont des protéines)*.

artificielle et manipulation du microbiote) sur un même corail est plus efficace que l'application d'une seule à la fois.

La plupart des techniques que nous utilisons n'en sont qu'à leurs balbutiements. Toutefois, certains éléments suggèrent qu'en les associant, nous aurons plus de succès. Une approche combinée se déroulerait ainsi : nous utiliserions d'abord la reproduction sexuée et l'évolution assistée pour obtenir au sein de populations de coraux une plus grande diversité et des individus plus résistants au stress ; ensuite nous passerions à la production en masse en élevage par multiplication asexuée ; puis nous transplanterions les individus obtenus sur des récifs.

Est-ce pour bientôt ? Pas exactement. Certaines techniques, comme la sélection artificielle sont faciles à mettre en œuvre immédiatement ; elles sont aussi peu coûteuses et efficaces. Toutefois, nous avons encore du travail afin d'établir la viabilité et l'adaptabilité à grande échelle des autres techniques, et de mesurer les risques d'entraîner des conséquences écologiques non anticipées. Il est possible, par exemple, que les traits artificiellement sélectionnés conduisent les coraux introduits à surclasser les populations natives au lieu de s'y intégrer, ce qui ruinerait nos efforts pour favoriser la survie des récifs.

BANQUE DE SPERME CORALLIEN

Que l'on utilise une ou plusieurs techniques pour renforcer les coraux, une autre étape est cruciale : il faut conserver des spermatozoïdes, des ovules, des larves et des fragments de coraux entiers au sein de réserves équivalentes aux banques de semences maintenues par les agronomes depuis des décennies pour améliorer le rendement des cultures, la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse. De telles banques permettent aux chercheurs de se procurer des éléments biologiques essentiels à l'amélioration de la résilience et de la biodiversité.

En s'inspirant des méthodes employées pour la fécondation *in vitro*, Mary Hagedorn de l'Institut de biologie de la conservation de la Smithsonian Institution, à Washington, a mis sur pied la première banque génétique pour espèces de coraux en danger. En 2004, quelques années après la naissance du premier bébé humain issu d'un ovule cryopréservé (préservé dans l'azote liquide), elle a en effet créé le programme de cryoconservation des coraux. Son équipe a mis en place un système de congélation du sperme corallien applicable à un large éventail d'espèces coralliennes. Pour le moment, elle a stocké 16 espèces provenant du monde entier, soit environ 2% des quelque 800 espèces coralliennes qui existeraient sur Terre d'après les estimations. Les spermatozoïdes décongelés ont des taux de fécondation comparables à ceux des spermatozoïdes frais et les embryons issus de la fécondation *in vitro* se développent en polypes juvéniles en bonne santé.

Mary Hagedorn a distribué ces germoplasmes, ou tissus vivants, dans les banques cryogéniques de divers pays. En théorie, ces banques sont capables de conserver ces tissus pendant des centaines, voire des milliers d'années. Les cellules pourront être décongelées un jour et servir à des projets d'élevage en mer ou en piscine. Les spermatozoïdes congelés serviraient par exemple à féconder des ovules venant de zones hors de leur territoire d'origine, et ainsi à introduire de nouveaux gènes dans un bassin génétique corallien. Les banques servent bien sûr aussi à préserver les espèces récifales susceptibles de décliner ou de disparaître.

UN RÉCIF AU CONGÉLATEUR

Outre le sperme, Mary Hagedorn travaille aussi à cryopréserver des ovules et même des larves entières. Elle espère y parvenir au cours des années à venir, puis elle s'attaquera à la cryoconservation de microfragments coralliens entiers. Son équipe développe aussi des techniques de cryopréservation de testicules de poissons afin d'aider à préserver la diversité des poissons récifaux. Son objectif ultime est de construire un ensemble de banques hautement sécurisées rassemblant les ovules, spermatozoïdes, embryons... des coraux et des autres espèces récifales en danger. « Nous n'avons aucune idée de ce que la science sera capable d'accomplir dans un siècle », estime-t-elle.

Ces différentes pistes peuvent surprendre. Nombre d'entre elles doivent encore être mises à l'épreuve, et de nombreuses interrogations subsistent quant à leur applicabilité à grande échelle, à leurs coûts et aux conséquences écologiques de la manipulation des systèmes récifaux. Toutefois, les risques de l'inaction sont connus : de fortes menaces pèsent sur les coraux et les nombreuses espèces qui en dépendent. Bien sûr, le premier défi reste de réduire les activités humaines responsables de ces menaces : les émissions de gaz à effet de serre, la pollution et la surpêche. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. P. HUGHES *ET AL.*, Global warming and recurrent mass bleaching of corals, *Nature*, vol. 543, pp. 373-377, 2017.

P. J. EDMUNDS *ET AL.*, Persistence and change in community composition of reef corals through present, past, and future climates, *Plos One*, article e107525, 2014.

Projet de l'Académie des sciences de Californie pour les récifs coralliens : www.calacademy.org/explore-science/ hope-for-reefs

Projet des microfragments du laboratoire marin Mote : https://mote.org/research/program/coral-reef-restoration

L'ESSENTIEL

- La haute mer, au-delà des limites des eaux territoriales, est l'objet de nombreuses convoitises.
- Elle est, en outre, soumise à de nombreux stress et la biodiversité, notamment planctonique, qu'elle abrite est particulièrement menacée.
- Il importe de l'étudier en détail pour comprendre les mécanismes des services écosystémiques qu'elle rend, la séquestration du carbone par exemple.
- La fondation Tara Océan est partie prenante de cette exploration scientifique et des pourparlers sur la protection de la haute mer.

L'AUTEUR

ROMAIN TROUBLE
directeur général de la fondation Tara Océan

La haute mer, terre de découvertes

L'exploration scientifique de la haute mer est indispensable à une meilleure connaissance de la biodiversité océanique et de sa dynamique. C'est un enjeu écologique planétaire ! Les discussions en cours pour sa protection doivent en tenir compte.

L'océan, le «Grand Bleu» produit environ 50% de l'oxygène que nous respirons. Il absorbe près de 25% du carbone présent dans l'atmosphère et joue un rôle majeur pour l'alimentation de la population mondiale. Il est aussi un régulateur essentiel de la température globale : il absorbe et redistribue la chaleur grâce à ses courants. Ces formidables «services» rendus par l'océan dépendant de sa bonne santé.

Or depuis plusieurs années, et de façon croissante, les études et rapports scientifiques montrent que l'océan est aujourd'hui soumis à de nombreux stress et que la biodiversité est particulièrement menacée. Les impacts cumulés du changement climatique (réchauffement, acidification, désoxygénation…) associés aux pollutions directes des populations humaines, se révèlent plus importants qu'on ne le croyait.

Les scientifiques parviennent assez bien à prévoir et modéliser l'évolution des processus physico-chimiques océaniques. Par exemple, plus l'eau de mer est chaude, moins les gaz, dont le CO_2, s'y dissolvent. Un océan plus chaud absorbera donc moins de gaz carbonique depuis l'atmosphère. La conséquence probable sera donc une accélération du réchauffement due à une diminution de l'efficacité du puits de carbone océanique.

En revanche, prédire l'évolution et l'impact des processus biologiques planctoniques impliqués dans la séquestration du carbone et donc le climat (en plus de la distribution et l'abondance des stocks de poissons et autres fruits de mer) est une tout autre affaire. Il faut d'abord connaître la composition biologique du plancton, comprendre comment les populations s'autoorganisent selon les paramètres physico-chimiques locaux (leur développement dans l'océan est intimement lié à l'évolution climatique), et enfin mesurer comment et à quelle vitesse le plancton pourrait s'adapter aux changements environnementaux. Il s'agit aussi de comprendre quelles espèces jouent un rôle clé dans les grands «services» écosytémiques, et notamment le piégeage et le transfert de carbone vers les couches profondes et les sédiments.

Décrypter le fonctionnement du plancton, cet écosystème continu, quasi invisible, en suspension et mouvement perpétuel, nécessite les méthodes de séquençage et d'imagerie à haut débit mise en œuvre lors de >

© Katatonia 82/Shutterstock | Portrait : © Tara Océan

l'expédition *Tara Océans 2009-2013* (*voir l'encadré page ci-contre*), en partenariat avec le Génoscope-CEA, le centre national de séquençage français.

Les chercheurs ont révélé des millions de séquences génétiques et des dizaines de milliers de nouvelles espèces planctoniques. Les réseaux d'interactions entre gènes et espèces planctoniques permettent enfin d'appréhender la complexité de l'écosystème de manière objective, et d'espérer l'intégrer dans les modèles écologiques.

LA HAUTE MER, UN CHEF D'ORCHESTRE

Aujourd'hui pourtant, en haute mer, ce trésor de biodiversité océanique échappe à toute protection et à tout contrôle des États. Préserver ce patrimoine est un devoir pour la survie des générations futures. De même, la liberté de recherche est une condition *sine qua non* pour anticiper les évolutions à venir et ajuster le cadre juridique international alors que ces ressources, et les services écosystémiques liés, sont essentiels pour assurer notre survie.

De fait, la haute mer, située au-delà des zones maritimes sous juridictions nationales, est devenue l'objet de toutes les convoitises. Navigation, transport de marchandises, migrations, exploration, câbles et télécommunication, l'espace de la haute mer est un espace de conquête et d'enjeux grandissant. Les négociations onusiennes, ouvertes en septembre 2018 à New York, s'annoncent longues et ardues au vu des enjeux: elles devront permettre de définir un Traité international pour l'utilisation durable et partagée de la biodiversité marine en haute mer.

Contrairement aux ressources minérales, les ressources vivantes situées dans ces zones ne sont pas considérées comme faisant partie du patrimoine commun de l'humanité par la Convention des Nations unies sur le droit de la mer. Les droits sur les ressources génétiques marines, quant à eux, font débat. Certains gènes issus des microorganismes comme le plancton représentent des trésors pour la médecine et les biotechnologies, et donc pour l'avenir des sociétés humaines. Mais ni leur exploitation, ni même leur existence n'avaient été envisagées par ladite Convention établie en 1982, à Montego Bay, en Jamaïque.

Aujourd'hui, près de 40 ans plus tard, de nombreuses ONG sont engagées sur les enjeux d'aires marines protégées et de pêche (*voir Des aires protégées ou désert marin ? par H. Le Meur, page 68*). Très peu travaillent sur les problématiques de la recherche scientifique en haute mer et à son développement. Associées à plusieurs consortiums scientifiques, les équipes de la fondation Tara Océan travaillent avec les chercheurs pour synthétiser et partager cette connaissance sur la haute mer et sa biodiversité, son rôle planétaire, pour mobiliser sur l'urgence de protéger l'océan. Sans connaissances sur ces écosystèmes, comment éclairer les décideurs politiques, prendre des décisions rationnelles sur la gestion des territoires maritimes, et permettre aux pays émergents et en développement d'utiliser ces nouveaux savoirs autour de l'océan?

Nous vivons une révolution technologique dans la recherche sur la biodiversité marine

LA RECHERCHE EN HAUTE MER

L'un des grands enjeux tient à la définition d'un cadre pour la recherche en haute mer, mais aussi et surtout pour organiser le partage des bénéfices tirés des ressources génétiques marines. Aujourd'hui, découvrir l'ADN de nouvelles espèces de plancton ou découvrir des fonctions biologiques inconnues intéresse la recherche médicale et de nombreux laboratoires pharmaceutiques. On parle de 90% des espèces marines encore à découvrir!

Elles recèlent des trésors d'informations sur la vie, l'adaptation du vivant, son évolution: des mystères biologiques à percer et à partager! La fondation Tara Océan défend une position équilibrée entre liberté de collecte, liberté de recherche et de découverte, et un accès pour tous aux ressources, en solidarité avec les pays en développement.

Depuis quelques années, nous vivons une révolution technologique dans la recherche sur la biodiversité marine. Aujourd'hui, les infrastructures et les disciplines scientifiques évoluent et les capacités d'observation de l'océan s'élargissent de façon inédite, avec la surveillance par satellite, les flotteurs déployés, le séquençage massif à haut débit de l'ADN environnemental, l'imagerie automatique, et le recours à l'intelligence artificielle pour comprendre les relations entre toutes ces données hétérogènes.

Selon la fondation Tara Océan, la définition d'un principe de «bien commun», avec obligation de partager les données en accès libre pour la communauté scientifique, est une priorité pour suivre cette évolution rapide.

La Convention sur le droit de la mer de 1982 demeure un outil juridique essentiel des relations et des échanges internationaux, mais elle doit être complétée au regard de l'avancée technologique ayant révélé le potentiel des ressources génétiques marines, insoupçonnées à l'époque. Les négociations s'annoncent très longues alors que l'agenda climatique et écologique s'accélère. Après

À LA RECHERCHE DE L'INVISIBLE

La goélette *Tara*, près de l'île Maurice

Embarquant des biologistes marins, des chimistes, des océanographes, des bio-informaticiens, généticiens… la goélette *Tara*, armée par la fondation Tara Océan, parcourt l'océan du globe pour étudier et comprendre l'écosystème marin et ses réactions au changement climatique et aux activités humaines.
La goélette a déjà parcouru plus de 450 000 kilomètres, faisant escale dans plus de 60 pays lors de quatre expéditions majeures, menées en collaboration avec des laboratoires internationaux (CNRS, EMBL, CEA, PSL, MIT…). Ces programmes scientifiques contribuent aujourd'hui à révolutionner les sciences de l'océan, à la croisée des disciplines pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes marins.
Partie en 2009, l'expédition *Tara Océans* a accompli l'inventaire de biodiversité le plus vaste jamais réalisé à l'échelle d'un biome planétaire, le plancton. Durant quatre ans, *Tara* a sondé tous les océans du globe, récoltant plus de 60 000 échantillons d'eau et de plancton, créant ainsi une base de données de référence dévoilant une photographie plus précise des différentes régions océaniques et des organismes qui les habitent. Plus de 80 articles ont été publiés dont une dizaine dans les prestigieuses revues *Science*, *Nature* et *Cell*. Ils relatent le premier recensement détaillé de la biodiversité planctonique planétaire, et constituent une ressource clé pour l'étude et la compréhension de l'Océan, par la communauté scientifique internationale. Les données, notamment issues du séquençage massif de l'ADN et de l'ARN océanique, d'images et mesures, permettent également d'explorer les interactions entre les microorganismes observés (compétition, collaboration, prédation, symbiose, parasitisme) et de comprendre l'impact des conditions environnementales sur cette véritable machine climatique qu'est la mer.
En plus des interactions biologiques, l'expédition *Tara Océans* a permis de comprendre de quelle manière les facteurs environnementaux tels que la température, le pH et les nutriments (entre autres) influencent le plancton.
Nous avons observé que aux profondeurs où pénètre la lumière du soleil, la température est le facteur environnemental principal influençant la composition des communautés de bactéries. Des communautés d'organismes différentes se forment en fonction de la température de l'eau.
De quoi donner à réfléchir dans le contexte de crise climatique actuel.
Dans une certaine mesure, ce n'est que le début, les ressources générées vont permettre de plonger encore plus profondément dans l'univers planctonique.
En comprendre les rouages qui régulent les grands cycles biogéochimiques du système Terre, bref comprendre comment ça marche.
Sans compter que le séquençage ADN de ces millions d'organismes, des virus aux animaux, recèle des mystères et des trésors génétiques détenant des informations cruciales sur l'origine de la vie, son évolution et sa complexification.

Durant quatre ans, *Tara* a sondé tous les océans du globe, récoltant plus de 60 000 échantillons

plus de 10 ans de discussions préalables, les États membres de l'ONU ont enfin abouti à la définition de quatre grands axes de négociation. Il s'agit de définir un cadre stable et ouvert pour la définition des aires marines protégées en haute mer ; d'approuver le besoin d'études d'impact environnemental indépendantes pour les activités humaines ; de définir des règles pour l'accès et le partage des ressources génétiques marines ; et enfin, de flécher de vrais financements pour renforcer les capacités de recherche et d'innovation des pays en développement.

Du dernier *round* de négociations en 2018, on retiendra un point très positif lié à l'aspect contraignant du traité à venir : il ne s'agira pas de simples recommandations, mais il aura force de loi, car il sera issu du droit international, inscrit sous l'égide de la Convention sur le droit de la mer. ■

© Sacha Bollet/ Fondation Tara Océan

L'océan Austral, un modèle ?

L'océan Austral, autour de l'Antarctique, un paradis blanc menacé ?

Célébrons le bicentenaire de la découverte de l'Antarctique en redécouvrant l'océan Austral et son mode de gestion original. Profitons-en pour renforcer sa protection et en faire un laboratoire et un modèle de la coopération internationale.

© D. Thiéron – Musée océanographique

L'ESSENTIEL

- Découvert il y a 200 ans, l'Antarctique est cerné par l'océan Austral. Les deux jouissent d'un statut particulier en termes de protection.
- Cela ne les empêche pas d'être menacés par le réchauffement climatique et, pour l'océan, la surexploitation, la pollution...
- L'établissement d'aires marines protégées aiderait à le préserver. Après quelques vicissitudes, un mouvement en ce sens semble lancé, notamment grâce à la Chine.
- Cet élan de protection pourrait ensuite s'étendre à l'ensemble des océans. L'humanité en serait la première bénéficiaire.

L'AUTEUR

ROBERT CALCAGNO
est directeur général de l'Institut océanographique, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco.

Le 19 février 1819, le capitaine britannique William Smith, à bord du *Williams of Blyth* rapporte avoir vu des terres au sud du 62e parallèle de latitude Sud. Voilà tout juste 200 ans, l'Antarctique était observé pour la première fois, par-delà les vents toujours violents, les courants et les glaces qui le défendaient et le soustrayaient à la connaissance et à la marche du monde. D'ailleurs, il faudra attendre le 21 janvier 1840 pour que Dumont d'Urville et son équipage plantent leur drapeau sur les terres antarctiques. Aujourd'hui, l'isolement de l'Antarctique et de l'océan Austral n'est plus qu'un souvenir, leur protection aussi.

Le continent blanc est désormais accessible en avion, sa péninsule accueille les bateaux de croisière et à peine le trou dans la couche d'ozone qui le surplombait se referme-t-il progressivement que l'Antarctique est en première ligne du réchauffement climatique. Fonte et dislocation des glaciers s'accélèrent, contribuant pour un tiers à la montée du niveau de la mer. Quant au courant circumpolaire, il n'empêche pas plus les microplastiques d'atteindre l'océan Austral que les vents n'interdisent à la pollution atmosphérique mondiale d'imprégner la glace. Nul doute que l'Antarctique sera l'objet de toutes les attentions du GIEC dans son « Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique », qui sera présenté à Monaco en septembre 2019.

UN RÉGIME DE GESTION AVANT-GARDISTE

Heureusement, à l'isolement physique a succédé un régime de protection internationale original et ambitieux, à tel point que la préservation de l'Antarctique et de l'océan Austral est l'un des grands succès de la diplomatie multilatérale depuis le milieu du XXe siècle. Avec le traité sur l'Antarctique de 1959 et surtout le Protocole de Madrid ratifié en 1998, l'Antarctique est un continent « dédié à la paix et à la science », protégé de toute exploitation économique. Qu'en est-il de l'océan qui baigne l'Antarctique?

De fait, l'océan Austral abrite une vie marine, d'une étonnante richesse. Sa diversité repose en particulier sur une grande productivité planctonique et sur le krill qui nourrit la plupart des prédateurs. Cette faune singulière adaptée à des conditions extrêmes a déjà révélé des propriétés exceptionnelles: l'antigel naturel des légines (des poissons), substances anticancéreuses produites par des espèces benthiques... C'est l'océan Austral qui permet la survie des quelques espèces terrestres, dont les célèbres manchots empereurs. Et le changement climatique, lorsqu'il éloigne la nourriture marine des colonies, met à mal la reproduction des manchots.

Pourtant, cette vie marine ne bénéficie pas du même degré de protection que le continent, et l'exploitation de l'océan Austral reste possible. Aujourd'hui essentiellement tournée vers le krill >

et la légine australe, la pêche est encadrée depuis 1982 par la Convention sur la conservation de la faune et de la flore marines de l'Antarctique (CCAMLR). Avec 25 membres (24 États et l'Union européenne) et 11 États adhérents, cette Convention rassemble tous les pays intéressés par la pêche ou la recherche scientifique dans l'océan Austral. Cas unique au monde, elle combine les objectifs de protection de l'environnement et de gestion des ressources, qui sont d'ordinaire menés par des organes distincts. Cette singularité permet une approche cohérente de la zone, tout en posant la question des priorités, entre exploitation et conservation.

La CCAMLR a consacré l'essentiel de ses 20 premières années à la gestion de la pêche. En s'appuyant sur un comité scientifique, elle a placé la science et la coopération internationale au cœur de la gestion des ressources naturelles et s'est donné des fondements remarquables: une approche écosystémique qui va au-delà de la gestion des stocks d'espèces commerciales, ainsi que le principe de précaution. On aurait pu espérer que ce dispositif, né du contexte géopolitique exceptionnel de l'Antarctique, serve de laboratoire pour une gestion responsable et durable de l'océan et essaime peu à peu. Pourtant, ces principes instaurés pour l'Océan austral n'ont pu franchir le courant circumpolaire, alors qu'à travers le monde la surexploitation et l'épuisement des ressources marines sont toujours la règle.

LE LONG CHEMIN VERS LES AIRES MARINES PROTÉGÉES

Depuis le début du siècle, la dégradation généralisée de l'océan, que l'on a longtemps cru inépuisable et inaltérable, est de mieux en mieux reconnue et un élan a vu le jour en faveur de la création d'aires marines protégées, ou AMP (*voir Des aires protégées ou désert marin ? par H. Le Meur, page 68*). Conçues à l'origine pour répondre à des enjeux locaux, notamment la surexploitation, on leur demande aujourd'hui de contribuer à la résilience des écosystèmes marins face au changement climatique mondial. En l'absence relative de perturbations d'origine anthropique, ces AMP sont également des observatoires précieux des effets du changement climatique.

L'attention se porte aujourd'hui sur la protection des dernières grandes étendues de nature à peu près préservée, ainsi que sur la haute mer. Après une décennie d'hésitations, les Nations unies ont réfléchi à un instrument permettant de mieux encadrer la mer au-delà des juridictions nationales. Certaines ONG invitent déjà à voir plus loin et à bannir totalement l'exploitation de ces espaces. Elles pointent du doigt la contradiction qu'il y a à consommer autant d'énergie – et souvent de subventions – pour poursuivre aussi loin les poissons, alors que la protection de la haute mer peut contribuer à régénérer des zones côtières plus proches des ports de pêche.

L'océan Austral est à la convergence de ces réflexions. En l'absence de riverains – puisque l'Antarctique n'appartient à personne – l'océan Austral est exclusivement constitué de haute mer, qui pour être particulièrement éloignée des centres de consommation et difficile d'accès, fait l'objet d'une pêche dynamique du fait de la valeur du krill et de la légine.

Considéré comme le cœur de la régulation du climat mondial par la distribution des courants qui transportent la chaleur, l'océan Austral est aussi en première ligne du changement climatique comme de l'acidification de l'océan.

En mars 2019, à Monaco, le groupe *Antarctica 2020* a appelé la CCAMLR à agir d'urgence et à mettre en œuvre des mesures de conservation efficaces avant qu'il ne soit trop tard, et à protéger d'ici 2020, 7 millions de kilomètres carrés des mers Australes, sous la forme de très grandes AMP. Pour *Antarctica 2020*, la protection de l'Antarctique n'est plus une question de choix, mais de survie.

La CCAMLR est un instrument précurseur qui permet justement à la communauté internationale de créer des AMP en haute mer. Dès 2005, les États parties décident la création d'un réseau d'AMP autour de l'Antarctique. Mais, si la première autour des îles Orcades du sud entre en vigueur dès 2009, le mouvement s'enraye vite et il faudra attendre 2016, après quatre échecs, pour que la mer de Ross amorce le dispositif à une échelle significative. Avec 2 millions de kilomètres carrés, c'est à ce jour la plus grande AMP au monde. À nouveau, la suite est incertaine. Le projet de création de cette AMP hors norme a bénéficié, dès 2010, d'un fort soutien de la Principauté de Monaco et de la Fondation Prince Albert II de Monaco en particulier, s'appuyant sur le développement d'un soutien à la fois public et gouvernemental.

Différents projets sont sur la table, en mer de Weddell, autour de la péninsule ou le long des côtes de l'est de l'Antarctique. Mais l'océan Austral n'a pas échappé à l'essoufflement du multilatéralisme depuis le début du siècle.

Sur le continent, le protocole de Montréal entré en vigueur en 1985 a sans doute épargné l'Antarctique d'une stérilisation aux ultraviolets en favorisant la reconstitution de la couche d'ozone. Mais depuis, du protocole de Kyoto à l'Accord de Paris, les grandes déclarations débouchent sur bien peu d'actions, et l'Antarctique pâtit de ce désengagement mondial. Même aussi loin, donner la priorité à la préservation de la nature ne va pas de soi.

Les considérations environnementales allant croissant, certains pays y voient une limitation inacceptable de leur liberté future. Ils vont jusqu'à retourner l'exigence de baser la décision sur la «meilleure science disponible» pour critiquer les fondements scientifiques des

L'Antarctique et l'océan Austral, si loin et pourtant si convoités.

projets d'AMP. Une bien étrange interprétation du principe de précaution !

La CCAMLR n'est ni la baguette magique tant espérée, ni une structure caduque. L'obligation de consensus qui y prévaut est un rappel qu'en matière de coopération internationale, les États ne sont contraints que par leur propre volonté. On peut s'interroger sur le droit d'un État à paralyser un accord international ; mais c'est un fait avec lequel on doit composer. Tout pays membre ou adhérent à la CCAMLR qui n'accepterait pas librement une contrainte reste libre de s'en retirer et de retrouver sa pleine autonomie – comme les États-Unis avec l'Accord de Paris.

LE PROCESSUS RELANCÉ PAR LA CHINE ?

Les progrès dépendront sans doute du rôle que la Chine entendra jouer à l'avenir. Le pays est un acteur majeur dans la course mondiale aux ressources naturelles, qu'elles soient halieutiques, agricoles ou minières. Mais la Chine fait aussi entendre sa voix dans les instances environnementales. L'organisation de la prochaine conférence des parties de la Convention sur la diversité biologique (CDB), en décembre 2020 à Kunming, sera l'occasion pour la Chine de clarifier ses positions et, espérons-le, devenir un acteur clé de la gestion durable de l'océan.

En mars 2019, Chuanlin Huo, représentant le Ministère de l'environnement de la République populaire de Chine, soulignait à l'occasion de la 10e édition de la *Monaco Blue Initiative* que son pays s'engageait en faveur de la biodiversité et des AMP. Selon lui, la prochaine réunion de la CBD pourrait être l'opportunité de déclarer un soutien à la création d'AMP en Antarctique.

Dans le même temps, la déclaration commune des présidents chinois et français indiquait que les deux pays s'engageaient, dans le cadre de l'ONU, à œuvrer en faveur d'un accord international sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine des eaux internationales. Les deux chefs d'État se sont également entendus sur la conservation et l'utilisation durable des ressources biologiques marines de l'Antarctique, y compris sur l'idée d'établir une aire marine protégée en Antarctique.

L'océan Austral est immense, encore préservé, et essentiel à notre planète. Il est grand temps de redécouvrir ce trésor et de bâtir sur près de quatre décennies de coopération internationale et de bonne gestion. Une nouvelle étape décisive est à portée de main : la création d'un réseau ambitieux d'aires marines protégées autour de l'Antarctique. Une telle décision remettrait l'océan Austral au cœur de l'élan mondial pour une gestion durable de l'océan, referait des instances existantes un modèle et marquerait une renaissance de la coopération internationale, qui pourrait s'étendre à la haute mer. Comme le rappellent si souvent les experts du GIEC, l'océan, l'Antarctique et l'atmosphère forment un ensemble vital pour notre planète et pour l'humanité. ■

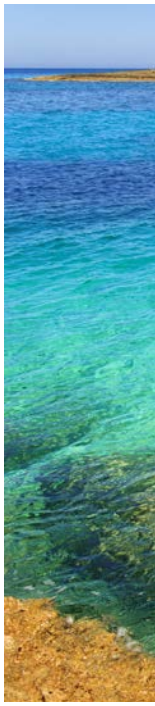
© D. Theron – Musée océanographique

L'ESSENTIEL

- Face à la chute des stocks de poissons, la création d'aires marines de très haute protection s'impose.
- Elles sont efficaces pour restaurer les écosystèmes, mais les États rechignent néanmoins à les imposer, de peur de mécontenter les populations riveraines..
- Pour résoudre le problème, une piste consiste à ajuster la règlementation en amont avec les pêcheurs, tout en maintenant une zone intégralement protégée.
- Le modèle a fait la preuve de sa pertinence, notamment en Italie, pour le bonheur des pêcheurs eux-mêmes.

L'AUTEURE

HÉLÈNE LE MEUR
est journaliste scientifique. Elle s'intéresse en particulier aux relations entre science et société.



Des aires protégées ou désert marin ?

Sanctuariser des aires marines pour préserver la biodiversité marine est une démarche qui se heurte souvent aux impératifs socioéconomiques. Un compromis est possible.

Surpêche, réchauffement climatique, pollution… les activités humaines dévastent les écosystèmes marins et côtiers. Et tous les voyants sont au rouge. Selon le récent rapport de l'IPBES (la Plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), 60% des stocks de poissons marins ont été exploités au maximum (selon des critères de pêche durable) et les objectifs fixés en 2010 par la Convention sur la biodiversité risquent fort de ne pas être atteints. Cette convention engageait les 160 États signataires à faire de 10% de leurs eaux territoriales des aires marines protégées d'ici à 2020. En 2015, seuls 3,7% des mers étaient concernés. On est loin du compte…

«C'est déjà un progrès notable, tempère Joachim Claudet, directeur de recherche au CNRS au laboratoire Criobe, puisqu'il y a 10 ans, on en comptait seulement 0,2% mais il ne faut pas relâcher l'effort.» Pour ce spécialiste des aires marines protégées (AMP), cet engagement est crucial, car ces zones où les activités humaines sont réglementées ont prouvé leur efficacité pour protéger la biodiversité marine. À condition d'adopter le bon type de réglementation.

LA TAILLE COMPTE

Historiquement, ce sont les aires marines protégées dites intégrales qui ont d'abord vu le jour. Dans ces zones, tout prélèvement est totalement interdit. Et le bénéfice écologique est au rendez-vous. «Quand on arrête tout usage extractif, confirme Joachim Claudet, les écosystèmes se restaurent, les poissons grandissent, sont plus nombreux et repeuplent même l'extérieur de la zone. Plus l'aire est vaste, plus elle est efficace.»

© Vadi Bero / shutterstock.com

À Torre Guaceto, près de Brindisi, dans les Pouilles, l'ouverture d'une aire maritime protégée fait le bonheur des pêcheurs.

© Damesea / shutterstock.com

LE RETOUR DU SAR…

À Torre Guaceto, en Italie, une pêche trop intensive avait décimé une espèce de poisson très prisée, le sar. Or les sars sont aussi indispensables à l'équilibre de l'écosystème. Ils mangent les oursins qui eux-mêmes mangent les algues dites dressées. Celles-ci sont un peu aux zones tempérées ce que sont les coraux aux zones tropicales : elles abritent quantité de larves, de juvéniles et sont indispensables à bon nombre d'espèces. Elles sont le signe du bon état de santé de l'écosystème. Quand les sars ont disparu, les oursins devenus trop nombreux ont mangé toutes les algues, ne laissant derrière eux qu'un désert de roches nues. Une aire marine protégée intégrale de 22 kilomètres carrés a alors été mise en place entre 2000 et 2005. Petit à petit, les sars y sont devenus plus grands, plus abondants, l'écosystème s'est restauré. Mais la loi obligeait à ouvrir la zone en 2005. D'où l'idée de l'écologue Paolo Guidetti d'impliquer toutes les parties prenantes, et surtout les pêcheurs, dans une démarche co-construite d'ouverture de l'AMP : on y a maintenu une petite zone intégralement protégée, sorte de sanctuaire à la fois source pérenne d'œufs et de larves et assurance contre une erreur de gestion. Les pêcheurs engagés dans la cogestion ont accepté d'être transparents sur l'abondance et la taille de leurs prises, données nécessaires à la mesure de l'efficacité de l'AMP. Ils doivent respecter une certaine longueur et taille de mailles de filet et surtout ils ne pêchent dans l'AMP qu'une fois par semaine. Résultat ? Cette seule journée hebdomadaire leur rapporte autant que l'ensemble des autres jours de la semaine de pêche à l'extérieur. De plus, même les zones extérieures en profitent puisque les larves de sar se dispersent sur plus de 100 kilomètres. Les pêcheurs de Torre Guaceto sont désormais les plus grands défenseurs de l'AMP.

Le sar s'en va et le sar revient.

Mais une réglementation aussi stricte n'est pas possible partout, surtout là où les populations dépendent de ces ressources marines, comme en Méditerranée. « On sait bien que dans des zones très peuplées, très impactées par les usages, des AMP gigantesques ne seraient pas respectées, admet Joachim Claudet ». De fait, ces sanctuaires ne représentent que 1,4% des mers et océans.

Comment alors protéger les écosystèmes tout en pérennisant les usages ? Pour atteindre les 10% requis, nombre de pays ont développé des AMP moins strictes.

Le problème, c'est que face aux résistances de tous ordres (opérateurs touristiques, pêcheurs, riverains…), les responsables politiques ont tendance à relâcher les réglementations. On a vu ainsi fleurir toute une gamme de niveaux d'autorisation des usages. « Résultat, déplore Joachim Claudet, on a aujourd'hui des AMP qui, *in fine*, n'atteignent pas leurs objectifs écologiques. » Sont-elles pour autant discréditées ?

Pour le savoir, le chercheur a analysé avec ses collègues toutes les études disponibles sur les AMP partielles, soit 36 aires au total, afin d'identifier les critères indispensables à leur bon fonctionnement. L'idée étant de guider les décideurs dans leur choix.

CONTRAIGNANTE OU SOUPLE ?

Selon leurs conclusions, deux stratégies sont possibles : adopter des réglementations de pêche soit très contraignantes qui minimisent les impacts, soit plus souples, mais couplées à l'existence d'une zone protégée intégrale, qui garantisse la bonne santé de tout l'écosystème environnant. Joachim Claudet est formel : « Sans cela, on épuise la ressource sans jamais restaurer les écosystèmes ! »

Autres leçons de cette étude, plus une AMP est protégée longtemps, plus elle est efficace. De même, plus le budget et l'équipe qui lui sont consacrés pour la gestion sont conséquents, plus les bénéfices sont importants. Cela peut paraître trivial, mais encore fallait-il le démontrer.

Joachim Claudet confirme que plus le niveau d'implication de toutes les parties prenantes en amont – en particulier des pêcheurs – est fort, plus les bénéfices écologiques sont importants (*voir l'encadré ci-contre*). Les autres objectifs qui en découlent, sociaux, économiques ou culturels sont aussi majorés. À l'inverse, sans bénéfice écologique aucun des autres ne peut exister. Pas de doute, les aires marines protégées, bien gérées, sont l'outil de choix pour restaurer la biodiversité de manière durable. ■

La mer, un coffre aux trésors

Dans son nouveau parcours « L'Océan du futur », la Cité de la mer, à Cherbourg, rend hommage à la planète bleue. Y sont notamment montrées toutes les solutions apportées à l'humanité par les espèces vivant dans l'océan : médecine, nourriture, nouveaux matériaux…

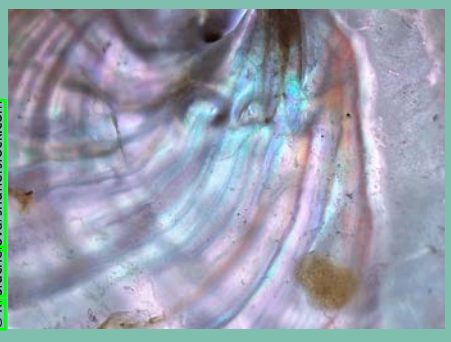
© La cité de la mer

UN CŒUR DE PIERRE

Le poisson pierre *Synanceia verrucosa* est difficilement détectable au milieu des roches. Il est en plus doté de 13 épines dorsales qui libèrent un venin redoutable pouvant entraîner jusqu'à la mort des victimes par paralysie des muscles cardiaques. Des biologistes cherchent à stabiliser la molécule active pour l'utiliser en cardiologie.

UNE COQUILLE À TOUTE ÉPREUVE

Le millefeuille de nacre qui constitue la coquille des ormeaux *Haliotis tuberculata* inspire les chercheurs pour fabriquer des céramiques très résistantes et pour concevoir des blindages et des gilets pare-balles.



© K. Stuchelova/shutterstock.com

© F. Bassemayousse / La cité de la mer

DU POULPE AU ROBOT

Dépourvus de squelette, les tentacules du poulpe sont des modèles de souplesse. Des ingénieurs ont mis au point un prototype de bras robotique inspiré de ces tentacules qui aide les chirurgiens à atteindre des zones du corps humain difficiles d'accès. En 2017, une équipe de Harvard a également mis au point un robot-pieuvre entièrement mou.

© La cité de la mer

© Rich Carey/shutterstock.com

UN CORAIL À DOUBLE EFFET

Le corail des récifs est utilisé en chirurgie, notamment dentaire, pour favoriser la reconstruction osseuse. Les coraux produisent également des substances qui inspirent les laboratoires pharmaceutiques, comme la palytoxine utilisée contre le cancer.

© OHishiapply/shutterstock.com

DANS LA PEAU D'UN REQUIN

La peau de requin est hérissée de denticules très durs qui créent une fine couche d'eau statique autour du corps de l'animal (c'est l'effet Riblet) et facilitent sa glisse. Des combinaisons de natation ont copié cette structure qui intéresse aussi les industries aéronautique et navale. La structure de la peau de requin est également un modèle pour la conception de revêtements antibactériens.

VEILLER AU GRAIN

LARVES RÉVÉLATRICES

Synergie mer et littoral (SMEL), un syndicat de professionnels de la mer de la Manche, détermine la qualité de l'eau de mer en observant la morphologie des larves d'oursins qui y évoluent.

© B. Zoonar/shutterstock.com

LA COLLE DE MOULE

La moule s'arrime aux rochers grâce à des filaments, le byssus. Nommé « soie marine » ou « soie des rois » il était utilisé pour tisser des vêtements de luxe. Aujourd'hui, ses propriétés adhésives et sa résistance intéressent les industriels.

© G. Guiffard / La cité de la mer

LA GUERRE DES ÉTOILES

Certaines étoiles de mer produisent une substance, la roscovitine, dont les propriétés anti-inflammatoires et antibactériennes sont testées chez des malades atteints de mucoviscidose afin d'améliorer leurs capacités respiratoires.

PAR LE SANG BLEU !

La limule est dotée d'un sang bleu qui coagule instantanément autour de certaines bactéries. On l'utilise dans l'industrie pharmaceutique pour stériliser le matériel biomédical. Ainsi, chaque année, environ 500 000 limules sont ramassées aux États-Unis.

LES BIENFAITS DU CRABE

Les guerriers chinois se soignaient à l'aide de baumes fabriqués à partir de carapaces de crabe. Aujourd'hui, on utilise le chitosane qu'elles contiennent dans des pansements afin de favoriser la cicatrisation.

© JasonBenzNenee/shutterstock.com

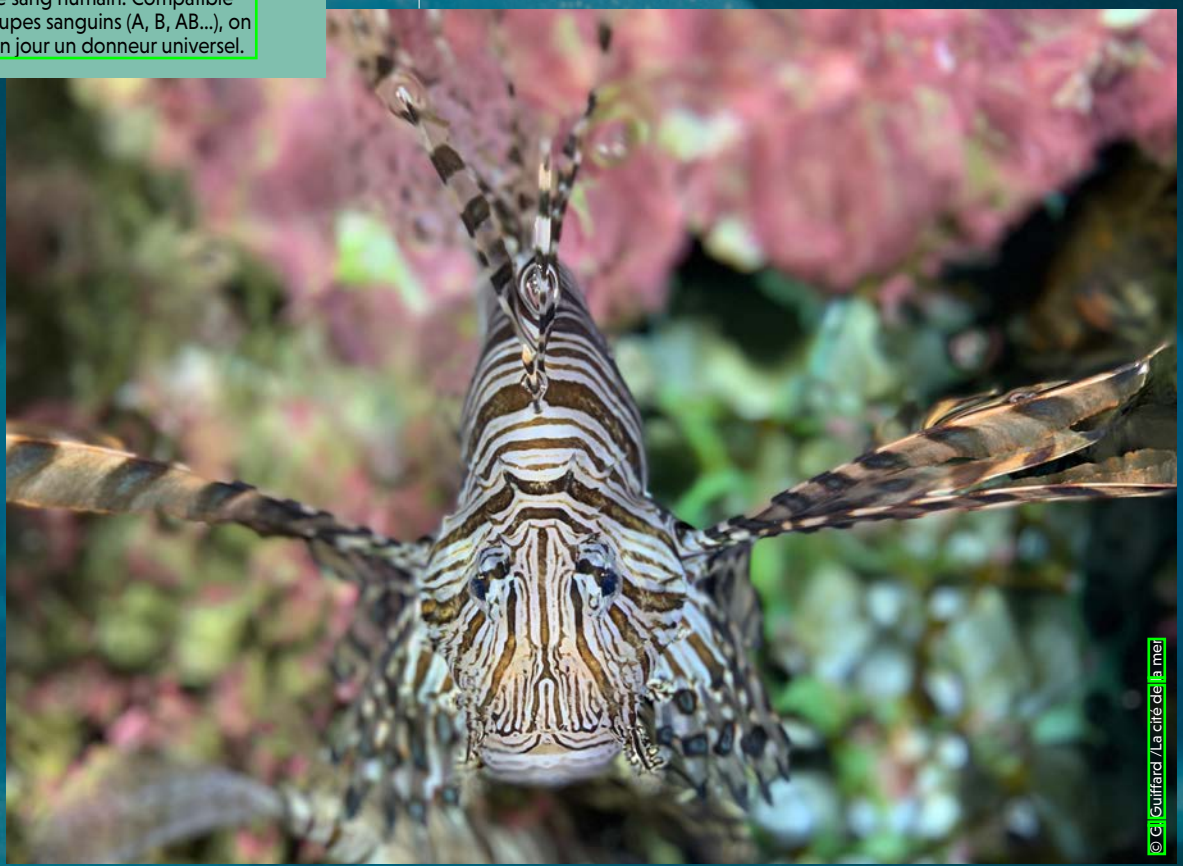
© B. Zoonar/shutterstock.com

UN DERNIER VER

Le ver arénicole, qui s'enfouit dans le sable des plages, a un sang qui stocke 50 fois plus d'oxygène que le sang humain. Compatible avec tous les groupes sanguins (A, B, AB...), on espère en faire un jour un donneur universel.

UN POISSON VOLE À NOTRE SECOURS

La rascasse volante *Pterois volitans* déploie ses ailes hérissées d'aiguillons venimeux. Ils contiennent des molécules qui détruisent de nombreuses espèces de bactéries et sont à ce titre étudiées par l'unité Biologie des organismes et écosystèmes aquatiques (CNRS) en partenariat avec la Cité de la mer.



© G. Guiffard / La cité de la mer

© La cité de la mer

Au chevet des tortues marines

Pourquoi, malgré la sympathie que nous avons pour les tortues marines, nous ne leur portons pas la considération qu'elles méritent ? À l'avenir, quelle place pourrons-nous leur laisser ?

© Rich Carey/shutterstock.com

La tortue imbriquée *(Eretmochelys imbricata)* est l'une des espèces de tortues de mer les plus menacées d'extinction.

L'ESSENTIEL

- Les tortues marines sont apparues il y a 110 millions d'années et vivent à la croisée des mondes de l'eau et de la terre.
- En conquérant les mers, en investissant les littoraux, en dégradant l'environnement, les humains ont bouleversé cet équilibre, mettant en danger les populations de tortues.
- Des mesures de protection sont prises depuis quelques années, mais l'équilibre reste fragile compte tenu des nombreuses pressions que nous faisons subir au milieu marin.
- Leur sauvegarde est entre nos mains et dépend de notre acceptation à laisser une place à la nature sur notre planète.

L'AUTEUR

ROBERT CALCAGNO
est directeur général de l'Institut océanographique, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco.

Déjà en 1998! Cette année-là, le journal télévisé d'Antenne 2 consacre un reportage à la mort d'une tortue luth venue de Guyane et échouée sur la plage près de Royan. L'autopsie, en direct, révèle que le reptile a succombé à une obstruction du tube digestif par des matières plastiques, probablement confondues avec des méduses. Le journaliste de conclure: « Quelques grammes de plastique jetés à la mer et c'est une tortue de 300 kilogrammes qui est menacée de mort. » 20 ans plus tard, la situation ne s'est pas améliorée, elle a empiré.

Parmi les sept espèces actuelles de tortues marines (réparties en 2 familles et 6 genres) qui peuplent les océans du monde à l'exception de l'océan Arctique, six sont vulnérables ou menacées. Deux d'entre elles (la tortue imbriquée *Eretmochelys imbricata* et la tortue de Kemp >

Lepidochelys kempii) sont même, selon l'UICN, en danger critique d'extinction. Les tortues marines sont pourtant protégées depuis 1991.

Durant les trois dernières décennies, la plupart de leurs populations se sont effondrées en grande partie en raison des activités humaines: braconnage, mais aussi urbanisation des côtes, surpêche, pollutions, collisions. Mais tout n'est pas encore perdu, et nous pouvons aider les tortues, en préservant leurs habitats par des mesures de dimension internationale et en améliorant nos connaissances à leur sujet.

UNE VIE DE VOYAGES

Au même titre que les serpents et les crocodiles, les tortues sont des reptiles et descendent donc d'un lointain lézard. La découverte d'un fossile dans une carrière du Bade-Wurtemberg, en Allemagne, au fond d'un lac pétrifié confirma cette hypothèse en 2015: cette *Pappochelys rosinae*, datée de 240 millions d'années, a une forme intermédiaire entre les lézards de cette époque et les tortues.

Quelques dizaines de millions d'années plus tard, certaines tortues se sont tournées vers la mer, sans doute pour échapper aux prédateurs terrestres et exploiter de nouvelles ressources alimentaires. Les premières tortues marines sont datées du Crétacé inférieur, il y a 110 millions d'années. Il existait quatre familles, dont deux se sont éteintes, celle des toxochélidés et celle des protostégidés qui comportait un géant, la tortue *Archelon ischyros*, dont la carapace atteignait 2,2 mètres de longueur.

Une impressionnante reproduction de fossile peut d'ailleurs être observée au Musée océanographique jusqu'à la fin de l'année, dans un parcours-exposition qui retrace l'histoire des tortues marines, de leurs origines à nos jours.

Dans l'océan, les tortues ont dû s'adapter pour survivre. Le premier défi fut celui de la forte salinité de l'eau de mer, potentiellement toxique. Les reins étant insuffisants à évacuer l'excès de sel, les tortues ont développé un second organe régulateur, les glandes lacrymales. Plus grosses que le cerveau, elles rejettent l'essentiel du sodium et une grande quantité de chlore. Ces sécrétions ressemblent à des larmes, laissant imaginer que les tortues expriment des émotions.

Autre adaptation, les pattes se sont aplaties et sont devenues des nageoires. De plus, la perte de mobilité entre les phalanges les a rigidifiées, les rendant plus adaptées. De même, leur carapace est devenue plate et profilée, facilitant aussi la nage. Mieux, des espaces se sont créés entre les plaques osseuses de la carapace, ce qui allège l'animal. Une tortue peut atteindre 35 kilomètres par heure, une vitesse équivalente à celle d'un maquereau.

UNE TORTUE PEUT ATTEINDRE 35 KILOMÈTRES PAR HEURE, UNE VITESSE ÉQUIVALENTE À CELLE D'UN MAQUEREAU

Parce qu'elle se déroule à terre, la ponte est l'épisode le mieux connu de la vie des tortues marines. Physiquement éprouvant, cet acte rend la femelle très vulnérable et l'expose aux pires dangers. Afin de constituer les réserves de graisse indispensable à leur reproduction, les mâles et les femelles fréquentent les zones riches en nourriture. Les femelles rejoignent ensuite les lieux de ponte. Là, de nuit, sur des plages à pente douce, elles creusent des nids et y déposent de 80 à 150 œufs. Entre aires de nourrissage et lieux de reproduction, les tortues marines parcourent des centaines, voire des milliers de kilomètres. Par exemple, des tortues caouannes voyagent sur près de 4000 kilomètres de l'île de la Réunion jusqu'à Oman, où se trouve l'un des deux plus gros sites de ponte de l'espèce.

Comment s'orientent-elles? Pour compenser les courants parfois forts, la visibilité restreinte en profondeur et l'absence de repères, elles disposeraient d'une sorte de boussole, dont on sait peu de choses. Elles seraient capables de déterminer leur latitude et leur longitude. Imprégnées de la signature magnétique de leur lieu de naissance, elles pourraient chaque année y retourner. Ce n'est pas suffisant, notamment en raison de la modification progressive du champ magnétique terrestre. Elles utiliseraient également l'odeur de la terre, transportée par les courants, ainsi que les courants eux-mêmes, porteurs d'informations.

Pour en savoir plus sur leurs migrations, leurs techniques de navigation, leur alimentation, leur reproduction... les investigations scientifiques se multiplient depuis une cinquantaine d'années. Dès 1952, des opérations de marquage, avec des bagues en métal, furent lancées pour suivre les voyages des tortues. Désormais, ce sont des puces électroniques insérées dans l'épaule qui renseignent les spécialistes, ainsi que des balises de suivi satellitaire de plus en plus miniaturisées et performantes. On suit même des bébés tortues!

UN APPÉTIT SANS LIMITE

Depuis des millions d'années, les tortues marines ont développé une pratique intime de l'océan, intuitive, de ses courants et de ses richesses. Même si la vie d'une tortue marine tient plus du parcours du combattant que de la croisière, cette pratique a assuré leur survie pendant très longtemps. Ce n'est que récemment que la donne a changé... Quel est le responsable de cette dégradation? L'humain et son appétit insatiable.

La consommation de leur viande, de leurs œufs, et l'utilisation de leur carapace sont les raisons initiales de la chute des populations de tortues marines. Ce déclin s'est amorcé au XIXe siècle lorsque la consommation de chair et d'œufs, jusqu'alors limitée à un cadre communautaire et rituel, a commencé à se banaliser. Il s'est accéléré avec l'essor du commerce des carapaces, transformées en objets exotiques pour l'Europe et l'Asie. À la fin du XIXe siècle, la France et la Grande-Bretagne importaient annuellement 16 000 carapaces, principalement de tortues imbriquées. La ressource s'épuisant, la pêche s'est emparée d'endroits reculés, comme Bornéo, Sulawesi, les Moluques...

Durant des siècles, une gestion durable des tortues, pratiquée de manière empirique, avait sauvegardé les différentes espèces. La rupture de ce fragile équilibre menace désormais de rayer des océans ces animaux essentiels aux écosystèmes marins, et, par ricochet, à l'humanité. Les différentes mesures de protection >

SAUVER LES TORTUES À MONACO

Le musée océanographique recueille des tortues malades ou blessées depuis de nombreuses années, comme cette toute jeune caouanne trouvée en avril 2014 dans le port de Monaco, très affaiblie par une eau trop froide pour elle. Une mission qui nécessite un travail en réseau essentiel, tant pour la phase de soins que pour l'étude et la compréhension des tortues marines, jusqu'aux actions de sensibilisation et d'éducation du public. De longue date, le musée océanographique collabore avec le Réseau des tortues marines de Méditerranée française (RTMMF), qui regroupe des observateurs bénévoles chargés de collecter des données à des fins scientifiques et de conservation. Le réseau est notamment alerté par les usagers de la mer (pêcheurs, plaisanciers, plongeurs, baigneurs...) et autres organismes, comme les gendarmeries maritimes ou les capitaineries de port, susceptibles de repérer une tortue en difficulté. Soutenu par le ministère de la Transition écologique et solidaire, le RTMMF organise des stages de formation et de perfectionnement et délivre les habilitations nécessaires pour manipuler les tortues, qui sont des espèces protégées. En avril 2019, le musée océanographique franchit un cap et renforce son action avec l'ouverture d'un nouvel espace de visite et de sensibilisation dédié aux tortues marines, sur près de 550 mètres carrés, ainsi qu'un parcours-exposition. L'occasion pour le grand public d'en apprendre davantage sur ces espèces menacées et de s'engager pour leur préservation. À l'abri des regards, le Centre monégasque de soins des espèces marines (CMSEM) est le cœur de ce nouveau dispositif. Il permet de recueillir, entre autres, des tortues blessées grâce au signalement donné par les usagers de la mer, et s'inscrit dans un réseau qui se construit à l'échelle de la Méditerranée. L'objectif : élaborer un maillage suffisamment important avec des centres implantés le plus régulièrement possible qui seraient autant de points de sauvetage pour les animaux blessés. Lorsqu'une tortue est admise, un protocole bien précis est mis en place. Si l'animal est décédé, une autopsie et des analyses sont réalisées en partenariat avec l'université de Montpellier. Les résultats sont alors transmis au RTMMF, dans le cadre de programmes de recherche communs. Si elle est vivante, un diagnostic est posé grâce à une batterie d'examens (auscultation, analyses de sang, mais aussi échographie ou scanner). Débute alors la phase de soins. La première patiente du CMSEM, *Avril*, souffrait d'un problème aux poumons qui nuisait à sa flottaison. Piqûre d'antibiotiques et séances d'inhalation dans une cuve lui ont été administrées pendant plusieurs jours. Différents types de soins peuvent être réalisés : bains d'eau douce, curetage, application de miel pour la cicatrisation, séances d'ondes magnétiques ou de lumière rouge... Une fois rétablie, la tortue quitte les bassins de soin pour le bassin de réhabilitation de 160 mètres cubes en extérieur, dernière étape avant le retour en mer, permettant à l'animal de renouer avec son instinct de chasse et ses réflexes naturels. Une mission que mène également le Centre d'études et de sauvegarde des tortues marines de Méditerranée (CESTMed) au Grau-du-Roi, qui durant la seule année 2016 a soigné 64 spécimens ayant ingéré des déchets, ayant été pris dans des filets de pêche ou percutés par des bateaux. Avec la Fondation Prince Albert II de Monaco et les Explorations de Monaco, l'Institut océanographique mobilise de nombreux partenaires pour la préservation des tortues marines. Au fil des ans, des actions ciblées à destination du public, des décideurs et des acteurs de terrain ont façonné un programme ambitieux visant à sensibiliser et à agir. Cet engagement sur le long terme, en collaboration avec les acteurs monégasques impliqués dans la protection de l'océan et avec des partenaires nationaux ou internationaux, a permis de multiplier les réalisations, par-delà les frontières. Missions d'étude et de balisage, ateliers pédagogiques, actions contre les pollutions, mobilisation des médias, organisation de colloques et de conférences... En 2020, le Musée océanographique accueillera un atelier international avec les experts de l'UICN, visant à définir les priorités de conservation des tortues marines à l'échelle mondiale.

Mise à l'eau de tortues marines dans le bassin de réhabilitation du musée océanographique de Monaco.

© MJDagnino - Institut océanographique

prises ces dernières décennies restent insuffisamment appliquées, et leurs violations sont rarement sanctionnées dans nombre de pays.

Malgré la très large ratification, à partir des années 1970, de conventions internationales protégeant les tortues marines, les captures demeurent autorisées dans une quarantaine de pays (Papouasie-Nouvelle-Guinée, Nicaragua, Australie…). Cette pêche légale s'accompagne d'une autre, dite «accessoire», toute aussi destructrice: les tortues sont prises par accident dans les chaluts à crevettes, les hameçons des palangres ou les filets maillants à poissons. Victimes collatérales d'un ratissage qui ne les vise pas, elles meurent, souvent asphyxiées, avant d'être remontées à la surface. La pêche dite «fantôme» assombrit encore le tableau: abandonnés au fond de l'eau, volontairement ou non, des filets continuent pendant des années à emprisonner et à tuer des tortues, entre autres animaux.

Pire: en dépit du renforcement des interdictions, le braconnage des tortues marines perdure à grande échelle dans certains pays en développement. Il est le fait de populations pauvres ne comprenant pas pourquoi elles devraient renoncer à une nourriture traditionnelle, riche en protéines, et particulièrement accessible. Mais aussi de réseaux transnationaux qui alimentent un trafic de carapaces, et surtout d'écailles, à destination de l'Asie.

COHABITER AVEC LES TORTUES ?

Outre la surexploitation, les menaces les plus importantes sont désormais liées à la fréquentation par l'homme des espaces nécessaires aux tortues. À terre, sur les côtes ou au large, leur cycle de vie est truffé d'obstacles: occupation du littoral, braconnage, impacts de la pêche, pollution, collisions avec les navires…

Parmi ces menaces, l'urbanisation du littoral est le péril numéro un pour les tortues marines. Et il est sans doute le plus difficile à juguler, tant les enjeux financiers sont importants. La croissance exponentielle du tourisme mondial, particulièrement dans le secteur balnéaire, entraîne un bétonnage accéléré des côtes. La construction d'aménagements au bord des plages, au plus près des flots, gêne l'accès aux sites de ponte, voire les détruit. En juillet 2012, sur l'île caraïbe de Trinidad, un lieu ancestral de nidification de tortues luths a été rayé en quelques heures de la carte. Des engins de chantier ont écrasé des milliers d'œufs et de nouveau-nés.

L'urbanisation engendre d'autres problèmes. L'éclairage artificiel qui l'accompagne désoriente les femelles venues pondre et les jeunes à peine éclos. Des tortues ont été retrouvées errant sur des parkings ou des routes à l'arrière des plages.

Sans surprise, les conséquences du rejet en mer de divers déchets, de résidus de pesticides et de métaux lourds sont considérables. En premier lieu, les polluants chimiques rendent les tortues vulnérables aux maladies. Ils sont ainsi soupçonnés de favoriser la fibropapillomatose, une pathologie se caractérisant par des tumeurs qui se multiplient et paralysent les fonctions vitales jusqu'au décès. Les plastiques flottant entre deux eaux sont tout aussi dangereux. Entravées par les plus gros, des tortues finissent asphyxiées. D'autres avalent les morceaux en les confondant avec des méduses qui comptent parmi leurs mets favoris. Les plastiques peuvent rester pendant des mois dans leurs intestins, entraîner des nécroses et des perforations fatales.

Une tortue caouanne dans le bassin de réhabilitation du musée océanographique de Monaco.

© M. Dagnino - Institut océanographique

Afin de mobiliser la société civile et de favoriser l'émergence de solutions efficaces pour une Méditerranée libérée des déchets plastique, la Fondation Prince Albert II de Monaco et ses partenaires (Tara Océan, Surfrider Foundation Europe, la Fondation MAVA et l'UICN) ont lancé l'initiative *Beyond Plastic Med* (BeMed) en 2015. Depuis sa création, le programme a déjà soutenu 23 projets dans 11 pays du pourtour méditerranéen. En 2019, 500000 euros ont été investis pour une Méditerranée sans plastique.

Pour sauver les tortues marines, nous devons en premier lieu, accepter de leur laisser une place. Un sacré défi à l'heure où l'attrait des vacanciers du monde entier pour les plages de sable fin et cocotiers n'a jamais été aussi fort et que l'aménagement touristique de ces littoraux est souvent perçu comme le principal, voire l'unique levier de développement économique pour les régions alentour.

Pourtant, bien géré, le développement touristique peut se révéler bénéfique, en participant

à la sauvegarde de sites et d'espèces menacées. Baptisé «écotourisme», respectueux et ancré sur la découverte du patrimoine naturel, il a vocation à bénéficier aux populations locales. À celles-ci, une tortue vivante peut ainsi rapporter plus d'argent, grâce à l'attractivité touristique, que sa chair et sa carapace. Dès lors, il devient plus intéressant de la protéger que de la tuer. L'écotourisme s'est développé au Costa Rica dans les années 1980 et l'ONU l'a consacré comme vecteur essentiel du développement durable en déclarant l'année 2002 «Année internationale de l'écotourisme».

Cependant, le terme «écotourisme» n'est pas lié à de réelles obligations. Librement utilisé par les acteurs, à bon ou mauvais escient, il est parfois galvaudé. Lors de sorties en groupe, les tortues sont approchées de trop près, harcelées en mer, éblouies à terre par des torches ou des flashs. Pour la conservation des espèces, l'écotourisme reste un pis-aller. Il permet pourtant de sensibiliser l'opinion, de financer des actions de préservation et de convertir certains braconniers en guides touristiques, protecteurs de l'environnement.

LE COSTA RICA EN PRÉCURSEUR

Le Costa Rica reste un exemple. Dans ce petit pays d'Amérique centrale, entre Atlantique et Pacifique, l'écotourisme sert de vitrine, mais aussi de locomotive économique. Avec 2,6 milliards de dollars (2,4 milliards d'euros) dégagés en 2014, le tourisme dit «vert» constitue désormais la première source de revenus. Dans ce panorama, les tortues marines ont une place et un statut particuliers. Sans échapper au braconnage qui sévit dans l'ensemble de la région, elles bénéficient d'un haut niveau de protection. Les captures y sont interdites, le ramassage des œufs prohibé ou réglementé… Avant d'en arriver là, autorités et organisations non gouvernementales ont bataillé ferme, tant l'exploitation des tortues était ancrée dans la culture et les traditions locales.

LAISSER UNE PLACE À LA NATURE

Un autre axe de protection est le développement des aires marines protégées. Il s'agit d'espaces marins délimités où s'exerce une réglementation spécifique des activités, visant à la conservation de la vitalité des écosystèmes marins, tout en permettant un développement local durable (*voir Des aires protégées ou désert marin ?, par H. Le Meur, page 68*). Pour les tortues marines, les bénéfices sont réels: l'encadrement de la pêche diminue les captures accidentelles, la maîtrise de la navigation réduit les collisions, les fonds marins et les zones d'alimentation comme de pontes sont préservés.

Le développement des aires marines protégées le prouve, l'homme, grandement responsable de la raréfaction des tortues marines, est aussi capable de se mobiliser pour voler à leur secours. Alors que ces animaux commencent à émouvoir l'opinion publique, des passionnés, bénévoles, chercheurs et responsables associatifs s'organisent pour les protéger. Certains surveillent les plages de pontes, placent si besoin les œufs en couveuse, veillent à ce que les nouveau-nés gagnent la mer sans encombre. D'autres analysent leur mode de vie, adaptent les engins de pêche pour limiter au maximum les captures accidentelles, avec par exemple des lignes de palangres qui peuvent être équipées, à coût réduit, d'hameçons spécifiques que les tortues ne peuvent pas avaler. Ou encore, le *Turtle Excluder Device* (TED), un filet doté d'une trappe de sortie permettant aux tortues de s'échapper.

De plus en plus fréquemment, les tortues blessées et secourues à temps bénéficient d'une prise en charge, grâce au développement, sous différentes latitudes, de centre de soins et d'une collaboration en réseau. La seule Méditerranée en compte trente-quatre, répartis dans quatorze pays. L'un d'eux vient d'ouvrir au musée océanographique de Monaco (*voir l'encadré, page 77*).

Les tortues marines symbolisent un monde devenu instable, qui peut prochainement basculer soit vers un retour à l'équilibre, quand on laisse la nature respirer, soit vers une disparition, quand on brise un maillon de la chaîne.

Victimes silencieuses de nos excès, les tortues marines peuvent-elles devenir les ambassadrices d'une nouvelle relation apaisée et respectueuse de l'homme avec la nature? Si nous ne laissons pas cette chance à des animaux que nous trouvons si sympathiques, à quelles autres espèces la laisserons-nous? ■

GARE AUX BALLONS!

Les lâchers de ballons, très appréciés des enfants, ne sont pas anodins. En altitude, les ballons se dégonflent ou éclatent, retombant souvent en de multiples fragments. Flottant en surface, confondus avec des méduses, ils sont ingérés par des tortues et des oiseaux. Une étude sur des tortues échouées en Australie, a montré qu'un tiers d'entre elles recelaient des débris de ballons dans leur tube digestif. Faut-il interdire les lâchers? En France, les dix communes de l'île de Ré ont franchi le pas en 2005, mais pour l'instant, elles font peu d'émules. Pour le bien des tortues, il devient urgent de faire évoluer la pratique. Selon l'association Robin des Bois, un million de ballons est lâché chaque année en France. Le musée océanographique lance un appel à idées pour trouver des alternatives écoresponsables aux lâchers de ballons, une bonne occasion de réfléchir et d'agir. Partagez vos bonnes idées par e-mail à fetesansballons@oceano.org ou sur le groupe Facebook «Fête sans ballons».

© Magdalina/shutterstock.com

À vos maillots de bain !

©JLBosky/shutterstock.com

AVIS DE TEMPÊTE

Nous avons toutes les cartes en main pour ne pas faire des océans un milieu hostile, et notamment envers l'humanité. Si nous diminuions les émissions de gaz à effet de serre, nous ralentirions la prolifération des méduses si problématique sur nos plages.
Du même coup, nous freinerions la hausse du niveau des mers qui menacent tant de zones habitées. Avec moins d'engrais azotés dans l'agriculture, les zones complètement dépourvues d'oxygène s'étendraient moins.
En renonçant à l'exploitation des métaux qui jonchent les plaines abyssales, nous laisserions une chance de survie aux espèces animales qui les peuplent.
À nous de jouer !

L'ESSENTIEL

- Depuis quelques années, les océans se gélifient: on y observe une augmentation spectaculaire des organismes gélatineux.
- Les méduses sont les principaux contributeurs de cette gélification.
- Surpêche, hausse de la température marine, pesticides, déchets... De multiples causes se dessinent.
- Par leurs étonnantes facultés d'adaptation, des méduses profitent de ces conditions.
- Comment lutter alors que la vie de la plupart de ces organismes nous est encore inconnue?

LES AUTEURES

CORINNE BUSSI-COPIN
est océanographe, chargée de mission pour la politique des océans à l'Institut océanographique, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco.

JACQUELINE GOY
est attachée scientifique de l'Institut océanographique. Elle a consacré sa carrière à l'étude des méduses au sein du Muséum national d'histoire naturelle.

L'invasion des méduses

Les méduses pullulent de plus en plus et transforment les mers en *jelly*. Rien ne semble enrayer l'essor de ces animaux pourtant si fragiles et rudimentaires, en apparence. Leur secret ? Une étonnante faculté d'adaptation... et le soutien involontaire des humains.

Personne ne l'a vu s'approcher. En quelques minutes, le banc de petits organismes gélatineux a colmaté les immenses filtres du circuit de refroidissement d'un réacteur de la centrale nucléaire de Gravelines, près de Dunkerque, provoquant son arrêt immédiat. Inutile de calculer le coût de revient d'une telle invasion, ni d'épiloguer sur le ridicule de la situation: la plus haute technologie humaine à la merci d'une boule de gélatine. C'était, il y a vingt ans, la première manifestation spectaculaire de la gélification des océans. Connu sous le doux nom de groseille des mers, le coupable, un animal marin carnivore et translucide de quelques centimètres, prolifère tant par endroits que la mer ressemble à... une gelée de groseilles décolorée. Mais les plus redoutés des contributeurs à la gélification des océans sont ses cousines, les méduses.

En quelques années, par leur pullulation, les méduses se sont imposées non pas comme sujet

© Paolo Barel II/Shutterstock

Pelagia noctiluca, le cauchemar des vacanciers. Alors qu'elle suivait jusqu'à la fin du XX^e siècle des cycles de 12 ans, cette méduse envahit désormais chaque année les rives de la Méditerranée

d'étude pour les chercheurs, mais comme une grave préoccupation des professionnels de la mer à cause des nuisances qu'elles provoquent. Ainsi, c'est un peu par la force des choses que les scientifiques se sont penchés sur le sujet, mais depuis, leur cri d'alarme est unanime: la conquête des océans par les méduses ne fait que commencer, et l'homme est leur plus précieux allié...

PRÉLUDE D'UNE CATASTROPHE

Les méduses sont des animaux très simples constitués de deux feuillets, l'ectoderme et l'endoderme, limitant une masse gélatineuse où sont insérés leurs deux uniques organes: l'estomac et les gonades (*voir l'encadré page 85*). Cela résume assez bien la vie d'une méduse: manger pour se reproduire. Et jusqu'au début des années 2000, la prolifération des méduses *Pelagia noctiluca* sur les côtes méditerranéennes était tout aussi simple: cyclique et bien réglée. Depuis les premières pullulations décrites dans la région, en 1775, il y avait des années à méduses et des années sans, selon une périodicité de 12 ans. Et cette périodicité était corrélée aux fluctuations climatiques, en particulier au recul des glaciers alpins. On avait même déduit de l'analyse des conditions climatiques que les années à *Pelagia* étaient toujours précédées de trois années chaudes peu pluvieuses. Mais depuis, les méduses *P. noctiluca* ont brouillé les pistes. >

La méduse *Cyanea capillata* doit son nom à sa couleur bleue et à ses nombreux tentacules qui évoquent une belle chevelure. De plus d'un mètre de diamètre, c'est la « crinière du lion », la meurtrière dans la nouvelle éponyme de Conan Doyle. On retrouve parfois ces méduses rassemblées en grand nombre.

© Institut océanographique - Yves Bérard

Cette méduse *Linuche unguiculata*, photographiée au large des côtes de Tahiti, pullule tous les ans autour de l'île, jusqu'à entraîner des interdictions de baignade et de navigation. Elle a la particularité de vivre en symbiose avec une algue *(les petites taches brunes)*. Les croissants orange sont ses gonades.

© Fabien Michenet/Anthony Berberian

Désormais, elles sont là tous les ans, été comme hiver, et il faudra apprendre à nager entre ces masses de gelée et en évitant soigneusement leurs tentacules pour ne pas être piqué (c'est l'espèce la plus urticante de la Méditerranée). Comment ces animaux que tous les naturalistes des XVII[e] et XVIII[e] siècles surnommaient *gelée de mer* ou *eau coagulée*, ces organismes composés à 98% d'eau – presque des gouttes d'eau dispersées dans la mer – ont-ils pu en si peu de temps contrarier tous les modèles de fluctuations hydroclimatiques établis jusqu'alors et qui avaient fonctionné pendant deux siècles?

Puisque, comme tous les animaux, les méduses mangent pour se reproduire, il est vraisemblable que l'étude de leur physiologie apportera des réponses. Que mangent-elles et quand se reproduisent-elles? C'est l'un des axes des programmes de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer animés par Gabriel Gorsky ou encore Fabien Lombard.

Manger? Vivant en pleine eau, les méduses mangent du plancton et leur régime alimentaire est varié. Elles attrapent aussi bien les œufs de tous les organismes marins que des larves et des adultes de crustacés ou de mollusques, voire des alevins de poissons. En étirant au maximum leurs tentacules très élastiques, elles augmentent considérablement le volume d'eau prospecté. Insatiables, elles sont capables d'avaler leur propre poids en nourriture en une journée. Elles exercent ainsi une prédation énorme sur le petit zooplancton (des animaux de quelques millimètres), mais aussi sur l'échelon supérieur des poissons. Par leur pullulation, elles deviennent le point central de l'écosystème pélagique marin en modifiant la composition du zooplancton et en diminuant l'ensemble de la production marine. Dès lors, elles sont devenues l'un des acteurs principaux des changements de la biodiversité marine.

Se reproduire? Dès que la température des eaux se réchauffe, au début du printemps, les méduses *P. noctiluca* mâles émettent dans l'eau des spermatozoïdes, lesquels fertilisent les femelles qui les avalent. Entre midi et 14 heures, les femelles pondent les œufs fécondés (de 0,3 millimètre, parmi les plus gros des méduses) et les évacuent par la bouche. Ces œufs éclosent, libérant une larve ciliée, la planula, dont la croissance aboutit en quelques jours à une petite méduse ou éphyrule. Chez cette espèce, il n'y a pas de stade fixé comme chez les autres méduses (*voir l'encadré page 86*).

LA SURPÊCHE, UNE AUBAINE

Ainsi, l'équation est simple: manger pour se reproduire – et plus la nourriture est abondante, plus vite la maturité sexuelle est atteinte (en cinq mois en moyenne pour *Pelagia*). En Méditerranée, *Pelagia* constitue presque un cas d'école: côté nourriture, la mer en regorge depuis que la surpêche a pratiquement éliminé les poissons, abandonnant ce qu'ils mangeaient aux espèces les plus opportunistes – les méduses. Quant à la température, elle croît inexorablement grâce à l'effet de serre, rendant les hivers moins rigoureux et prolongeant l'été. Dans ces conditions favorables, les méduses *P. noctiluca* se reproduisent en masse et s'installent durablement.

La conjonction de ces deux phénomènes est l'une des explications les plus vraisemblables de la disparition de leur périodicité. On utilise d'ailleurs cette espèce comme témoin, une sorte de marqueur des changements profonds qui touchent l'écosystème pélagique de la Méditerranée.

Déjà en 1983, au congrès d'Athènes organisé par le Programme des Nations unies pour l'environnement, David Cargo, spécialiste américain des méduses, avait manifesté son intérêt pour les études sur celles de la Méditerranée, afin d'en transposer ensuite les résultats à d'autres mers. Cela est d'autant plus plausible que tous les océanographes s'accordent pour considérer la Méditerranée comme un modèle réduit d'océan et donc comme un modèle de production biologique. D'où l'intérêt des programmes qui se poursuivent depuis plus de 30 ans dans tous les laboratoires riverains.

De fait, la Méditerranée est loin d'être la seule zone concernée. Différents observateurs (touristes, pêcheurs, industriels...) ont rapporté des scènes identiques de pullulation dans toutes les mers de la planète. L'inventaire des zones infestées fait ressortir une vingtaine d'espèces de méduses dont la prolifération est due à une même cause désormais bien identifiée et produisant les mêmes déséquilibres: la surpêche. Des zones entières sont devenues de grands déserts marins où se côtoient des populations de méduses qui paraissent définitivement installées et une faune appauvrie survivant à leurs agressions.

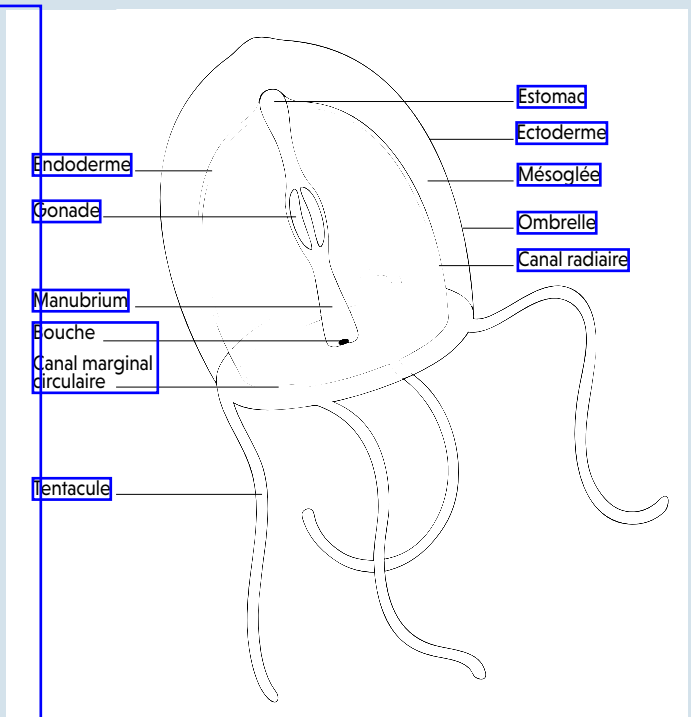
Le cas le plus spectaculaire est celui des eaux territoriales de la Namibie, sur la côte sud-occidentale de l'Afrique, eaux réputées il y a 60 ans encore pour leur exceptionnelle richesse en poissons frétillant dans le courant du Benguela. Ce courant froid océanique qui longe la côte depuis l'Afrique du Sud jusqu'à la zone équatoriale produit une remontée des eaux profondes riches en nutriments, favorisant la productivité du plancton et de l'ensemble de l'écosystème. Au large de la Namibie, la mer regorgeait de petits poissons (sardines, anchois) qui attiraient les grands prédateurs – poissons (merlus, thons, mérous), oiseaux marins et otaries.

LE DÉSERT DU GOBIE

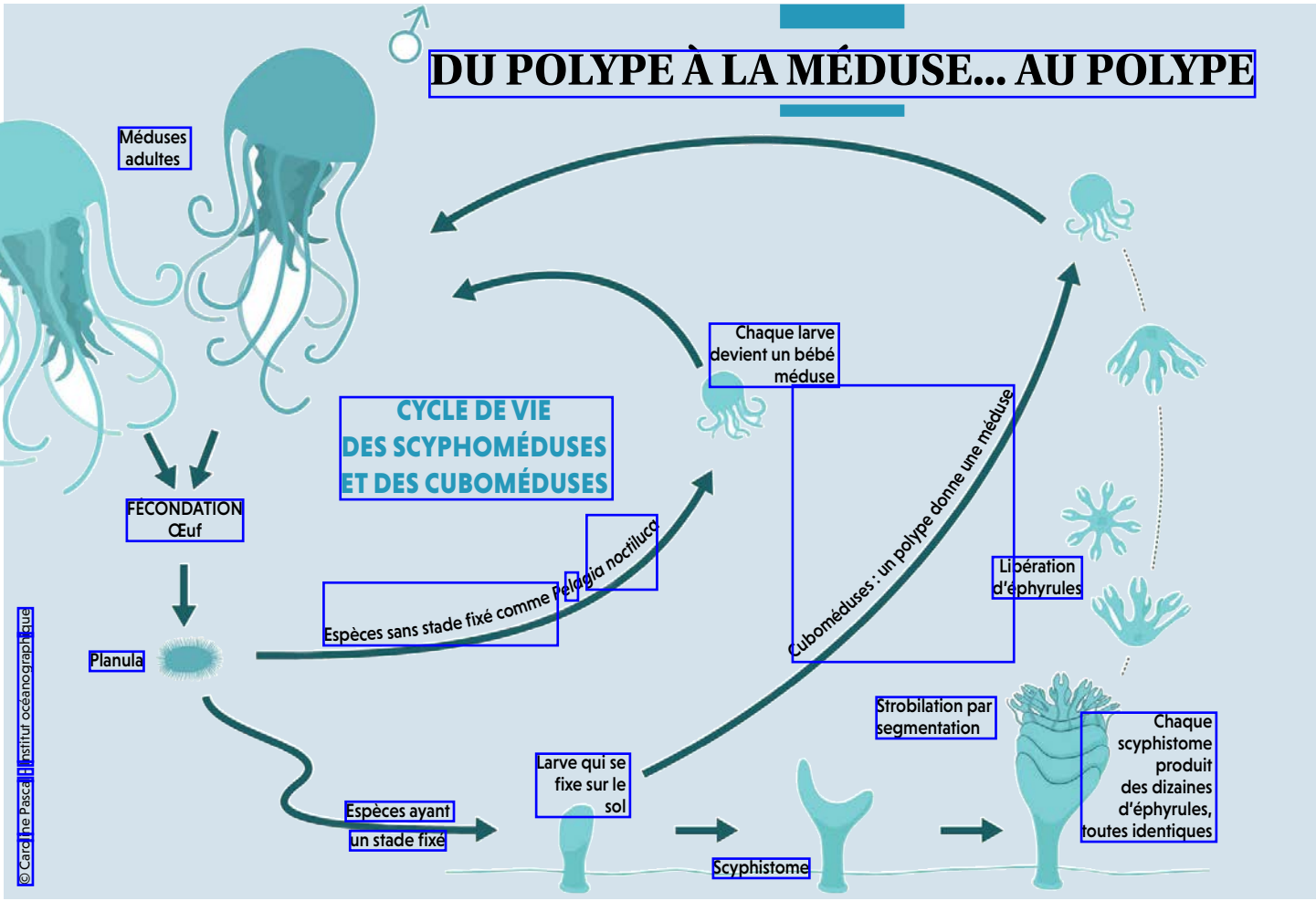
La pêche s'est intensifiée. Les grosses proies se raréfiant, les pêcheurs se sont rabattus sur les sardines et les anchois. À partir des années 1960, de multiples chalutiers ont déversé leur trésor de poissons dans des navires-usines, poissons aussitôt transformés en farine. Depuis 15 ans, l'effondrement des stocks de sardines et d'anchois a entraîné un changement total de la production biologique dans les eaux namibiennes. Les oiseaux de mer et les mammifères marins >

SIMPLE, MAIS REDOUTABLE

L'apparente fragilité des méduses cache une remarquable efficacité pour se nourrir. Le corps de ces animaux s'organise en parapluie à partir de l'ombrelle, constituée d'une masse gélatineuse, la mésoglée, délimitée par deux feuillets, l'ectoderme et l'endoderme.
Au centre de l'ombrelle pend le manubrium, renfermant l'œsophage, qui relie la bouche à l'estomac et qui contient aussi les gonades chez certaines espèces.
L'ombrelle est bordée de filaments – les tentacules –, parfois regroupés en faisceaux. Pour se nourrir, les méduses utilisent une arme originale: les cnidocytes, des cellules urticantes contenant un micro-harpon venimeux, dont sont couverts leurs tentacules (chez certaines méduses, ces cellules tapissent tout le corps). Lorsqu'un minuscule cil associé au harpon détecte le contact avec une proie, le harpon, jusqu'alors replié, se détend, pénètre dans la proie et injecte le venin. Le tentacule ramène alors la proie paralysée à la bouche, qui l'engloutit. Entourée de lèvres parfois si allongées qu'elles forment des bras, la bouche rejette aussi les déchets.
L'estomac est prolongé par des canaux radiaires qui rayonnent comme les baleines d'un parapluie et aboutissent à un canal marginal circulaire, lequel nourrit tout l'organisme.
Restés attachés à la proie, les cnidocytes sont immédiatement remplacés par d'autres cellules de même nature. Celles-ci se forment à la base des tentacules, zone d'activité intense de différenciation de cellules souches, puis migrent le long du tentacule jusqu'à la zone concernée.
Les méduses réservent bien d'autres surprises. Elles respirent par la peau. Elles disposent de minuscules organes de l'équilibration, les statocystes, répartis au bord de l'ombrelle, de même que des ébauches d'yeux reliées à des cellules nerveuses. Elles ont aussi la capacité d'émettre de la lumière: leur gène de bioluminescence est devenu un outil classique en biologie.



© Pour la Science



sont en régression, et le gobie, le seul prédateur encore en lice, est en voie de disparition. Les méduses, qui jusqu'alors luttaient pour une petite part du territoire, ont profité à la fois de la raréfaction de leurs prédateurs – notamment les thons et les tortues – et de celle de leurs compétiteurs directs pour le zooplancton : les anchois.

CHANGEMENT DE RÉGIME

En particulier, deux méduses de grande taille quasiment absentes de cette région dans les années 1950, *Aequorea forskalea* et *Chrysaora hysoscella*, se sont mises à pulluler et à supplanter les poissons, au grand dam des habitants, privés de leurs plats traditionnels. La biomasse des méduses dans les eaux namibiennes est aujourd'hui estimée à trois fois celle des poissons ! Par comparaison, et pour conforter ces observations, l'Afrique du Sud voisine, qui a établi des conditions rigoureuses de pêche dans ses eaux, ne connaît pas d'anomalies aussi spectaculaires dans son environnement marin.

D'autres zones sont touchées. En mer de Chine, la baie de Liaodong, dont Jing Dong, de l'Institut de recherche des pêcheries marines de Liaodong, et ses collègues étudient la rentabilité de la pêche commerciale depuis 1984, est devenue un immense plan d'eau réservé à l'élevage de *Rhopilema esculenta*, une espèce comestible et la seule par ailleurs à résister à la dégradation du milieu due à la surpêche et à la pollution chimique.

La baie de Chesapeake, sur la côte orientale des États-Unis, a elle aussi subi une agression, d'abord à cause de l'augmentation de la population humaine sur ses rives, puis de la pêche et enfin de la récolte des huîtres, laissant cette baie envahie par la pollution. Une autre méduse *Chrysaora*, l'espèce *C. quinquecirrha*, a exercé une prédation telle que l'écosystème est aujourd'hui fortement modifié : d'abondantes espèces gélatineuses, sans aucun intérêt commercial, se succèdent tout au long de l'année.

Et les exemples s'accumulent : *P. noctiluca* s'attaquant aux fermes de saumons dans le nord de l'Écosse, attirée par l'abondance de nourriture ; *Aurelia aurita* bouchant les filtres des tuyaux de refroidissement des centrales nucléaires installées dans les fjords de Suède ou immobilisant un porte-avions américain dans le port de Brisbane… Les mêmes causes (nourriture abondante du fait de la surpêche et température anormalement élevée) ont produit les

L'originalité des méduses, et certainement leur plus grand atout, est d'avoir, pour la plupart, un cycle de vie comportant un stade plus discret – le polype. La différence entre les stades polype (fixé à un support) et méduse (libre) est telle qu'on les a longtemps pris pour deux espèces différentes.
Les méduses se reproduisent en pleine eau de façon sexuée : des mâles produisent des spermatozoïdes, et des femelles, des ovules. En général, les cellules reproductrices sont évacuées dans la mer, où a lieu la fécondation. L'œuf évolue en quelques heures en une larve ciliée, la planula, qui tombe sur le fond, s'y fixe et devient un polype. Chez les espèces de la classe des *Scyphozoa* telle *Aurelia aurita (de a à d)* et chez les cuboméduses, notamment, le polype, nommé scyphistome, bourgeonne ou reste solitaire *(a)*. Sous de bonnes conditions de température et de nourriture, des sillons se forment dans sa partie supérieure *(b, c)*. Chaque segment ainsi produit se détache en éphyrule qui se développe en pleine eau *(d)* pour donner une méduse sexuée. Un polype en produit ainsi des dizaines. Certaines espèces de *Scyphozoa* n'ont cependant pas de stade fixé, comme *Pelagia noctiluca*.

© Institut océanographique / Microaquarium

mêmes effets : une déviation de la production des océans vers le maillon gélatineux.

Toutefois, les pêcheurs ne sont pas les seuls responsables de cette dégradation du milieu marin. Ils sont allés pêcher dans les zones qu'on leur avait indiquées. Grâce à l'*Atlas des ressources biologiques des mers* publié en 1972 par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, ils avaient à leur disposition une cartographie précise de la répartition des espèces commerciales appartenant à tous les groupes depuis le phytoplancton, le zooplancton, les mollusques, les crustacés jusqu'aux principales espèces de poissons et de mammifères marins.

À QUI PROFITE LE KRILL…

Cet atlas a été établi grâce aux relevés des instituts des pêches du monde entier et il a fait la fierté des statisticiens qui, hélas, n'avaient pas prévu la moindre mise en garde sur la fragilité de ces stocks. En 30 ans, cette manne a été dilapidée et la pêche minotière s'attaque désormais à d'autres groupes que les poissons, en particulier au krill. Or, ces petites crevettes des eaux froides – les Euphausiacés (*Meganyctiphanes norvegica* dans les eaux boréales et *Euphausia superba* dans les eaux australes) – sont indispensables à la vie de nombreux animaux : mammifères marins (la baleine en mange plusieurs tonnes par jour), oiseaux, poissons, calmars…

De plus, l'absence de krill, grand consommateur de phytoplancton, permet à d'autres animaux pélagiques phytophages et à fort taux de croissance et de multiplication de pulluler, en particulier les salpes, des animaux coloniaux gélatineux dont les chaînes dépassent parfois cinq à six mètres de longueur. Ces animaux contribuent à la gélification des océans au même titre que les méduses. Et comme ils renferment 90 % d'eau, ils n'offrent aucun avantage alimentaire aux prédateurs supérieurs. Ils ont un autre inconvénient, majeur : ils colmatent les fanons des baleines, empêchant la filtration du plancton nourricier.

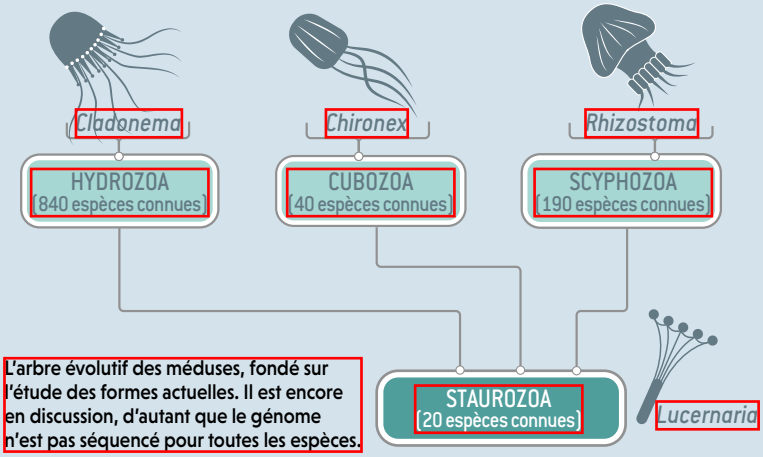
Outre la pêche, les stocks de krill s'effondrent aussi par un autre mécanisme plus complexe, faisant intervenir plusieurs niveaux du réseau trophique pélagique (l'ensemble des chaînes alimentaires de la mer). L'usage des pesticides dans l'agriculture intensive a un impact sur les organismes marins lorsque, par lessivage, ces produits toxiques se déversent en mer. Destinés à bloquer la mue des insectes, ils bloquent celle des >

BESTIAIRE GÉLATINEUX

Tout ce qui flotte en mer n'est pas méduse ! Le plancton gélatineux – l'ensemble des organismes gélatineux qui flottent en pleine eau, entraînés par les courants – compte ainsi nombre d'autres organismes si divers qu'il est impossible de représenter leur classification.
Il comporte les siphonophores – telle la physalie –, souvent pris pour des méduses parce qu'ils présentent aussi des cellules urticantes ; les cténaires, telle la groseille de mer, dont les deux tentacules portent des cellules adhésives et non urticantes ; les thaliacés, telles les salpes, animaux coloniaux non urticants qui se nourrissent en filtrant le phytoplancton ; sans oublier les œufs des poissons.
À elles seules, les méduses ont des caractéristiques si variées que même à leur échelle, la classification est un casse-tête. On en compte plus de 1 000 espèces, peu connues pour la plupart. On distingue tout de même quatre grands groupes.
Les *Scyphozoa* ou « méduses vraies », dont on connaît 190 espèces, sont très variées : de quelques millimètres à deux mètres de diamètre, rondes, carrées, plates ou en dôme, lisses ou lobées, avec ou presque sans tentacules, avec des bras oraux lisses ou en chou-fleur. Comme les *Scyphozoa*, la plupart des *Hydrozoa* ont un stade fixé (polype) et un stade libre (méduse). On en dénombre 840 espèces, dont seulement 20 % ont un cycle de vie connu.
Les *Cubozoa*, qui tirent leur nom de leur forme cubique, comptent 40 espèces. Enfin, les *Staurozoa* – 20 espèces – n'ont pas de stade libre. L'une d'elles, la très rare *Lipkea ruspoliana*, serait aux méduses ce que le cœlacanthe est aux vertébrés : un lointain ancêtre commun…

Groseille des mers

Physalie, vessie de mer ou galère portugaise



L'arbre évolutif des méduses, fondé sur l'étude des formes actuelles. Il est encore en discussion, d'autant que le génome n'est pas séquencé pour toutes les espèces.

© Broadbelt Ievantravels/shutterstock.com

crustacés, également des arthropodes, qui n'atteignent plus le stade adulte. C'est ce qu'ont montré notamment Rabin Sen Gupta, de l'Institut océanographique indien, à Dona Paula, et ses collègues en 1996. Des pans entiers de la biologie marine sont touchés, notamment le krill, ce qui favorise encore la prolifération des salpes et d'autres organismes gélatineux phytophages.

Et comme si ce scénario ne suffisait pas, il faut encore lui ajouter l'effet indirect des résidus médicamenteux sur la gélification des océans. Les hormones de substitution sont ingurgitées en concentration telle que les excès sont rejetés dans les urines et ne sont pas retenus par les stations d'épuration, non équipées pour filtrer ces molécules. Arrivés en mer, ces hormones et d'autres perturbateurs endocriniens ont le même effet sur les organismes marins que sur le corps humain: blocage de la reproduction sexuée et féminisation. Toutefois, ces produits épargnent les espèces qui, comme les salpes et les méduses, ont d'autres voies de reproduction. Cette explication de la gélification des océans est très probable à cause du rendement de ce mécanisme de multiplication, mais doit encore être confirmée.

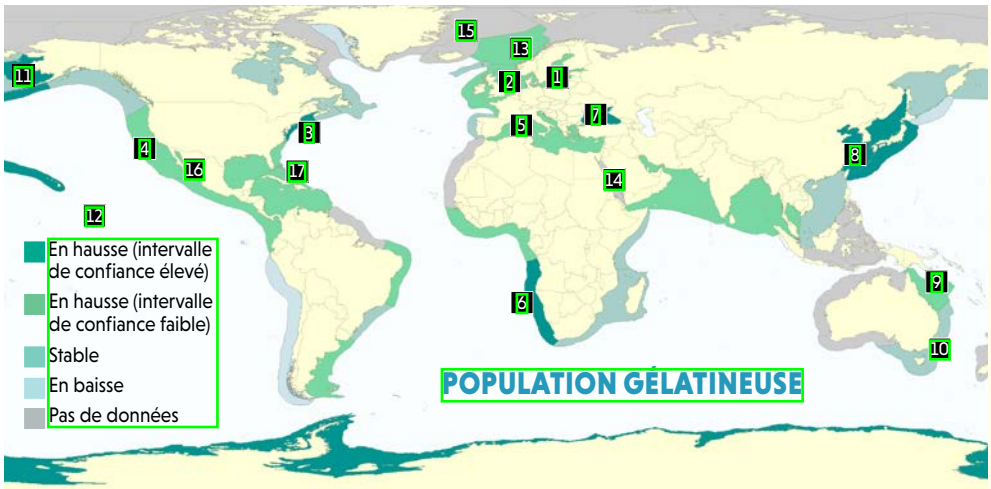
Le cycle de vie des méduses préoccupe d'ailleurs particulièrement les biologistes. Contrairement aux salpes, qui effectuent tout leur cycle de vie en pleine eau, la plupart des méduses ont un stade fixé à un support, le polype. Ce stade correspond à la forme de résistance des méduses qui restent ainsi tant que la température de l'eau n'augmente pas. Il est difficile de localiser les polypes à cause de leur petite taille. Or ils sont à l'origine des pullulations de méduses: lorsque la température de l'eau est suffisamment élevée, ils bourgeonnent abondamment.

En général, l'œuf des méduses évolue en larve qui se fixe et se transforme en polype. Deux types de bourgeons se forment: les uns, identiques au polype, restent reliés à lui et forment une colonie nommée hydraire. D'autres s'évadent des polypes. Ce sont alors des méduses qui nagent, grandissent et se reproduisent. Mais les conditions du milieu modifient ce schéma. Certaines méduses émettent des œufs de résistance. C'est le cas de *Margelopsis haeckeli* qui conserve dans ses tissus un œuf plein de réserves pour survivre dans le froid et la nuit polaires. De plus, toutes les méduses ont la capacité de résorber leurs cellules sexuelles déjà formées en cas de disette et de les utiliser comme produits de réserve, puis de reprendre leur croissance quand les conditions s'améliorent. On voit là toutes les stratégies adaptatives sélectionnées au fil de l'évolution et permettant à ces animaux de survivre si les conditions du milieu sont perturbées.

DES ENVAHISSEURS IMMORTELS

En combinant ces réactions des méduses aux modifications de l'environnement, on comprend comment des organismes d'apparence aussi fragile transforment la mer en « gelée ». Cette résistance expliquerait comment ces animaux ont traversé toutes les vicissitudes des ères géologiques depuis plus de 600 millions d'années, âge du gisement d'Ediacara, en Australie, où ont été récoltés leurs premiers fossiles.

À cela s'ajoute l'étonnante immortalité des méduses, qui a fait la joie des médias du monde entier avec l'exemple de la petite méduse *Turritopsis nutricula*, dont les élevages ont mis en évidence la capacité à revenir à un stade antérieur de développement. Ce phénomène, qu'un



La gélification des océans est un phénomène mondial, comme le montre cette carte, fruit d'une méta-analyse réalisée en 2012 sur les écosystèmes marins le long des côtes. Les méduses impliquées, dont certaines sont indiquées ici, diffèrent selon les mers. Sur le millier d'espèces connues, toutes ne pullulent pas. Moins d'une vingtaine sont problématiques.

naturaliste suisse, Pierre Tardent, a qualifié de réversion en 1980, consiste en une inversion du cycle de vie et avait été décrit dès 1844 par le biologiste belge Édouard Van Beneden. De nombreux auteurs se sont étonnés de ces réversions et les ont attribuées aux mauvaises conditions d'élevage. Elles traduisent surtout l'exceptionnelle capacité des méduses à résister dès que le milieu se dégrade. Certaines peuvent même s'enkyster, telles ces méduses d'eau douce *Craspedacusta sowerbyi* qui ont survécu sous cette forme de kyste pendant plus de 40 ans.

Tous les polypes n'émettent pas leurs méduses au même rythme. Seules une vingtaine d'espèces bourgeonnent avec une intensité telle que le milieu est vite envahi. C'est le cas de la méduse-lune *Aurelia aurita*, très répandue sur la côte atlantique, dont le polype se segmente à une cadence exceptionnelle d'environ une éphyrule par jour en été. À l'inverse, les méduses australiennes – les redoutables cuboméduses – ont un polype qui reste isolé et qui se métamorphose en une seule méduse, ce qui limite leur pouvoir de pullulation. Heureusement, car elles sont parmi les animaux les plus toxiques et certaines sont même mortelles.

Cependant, une autre préoccupation se dessine : restreintes pour l'instant à la zone tropicale indo-pacifique, les aires de répartition de ces cuboméduses pourraient s'étendre. Les océanographes redoutent que l'augmentation de la température des eaux de surface dilate la zone tropicale vers le nord et vers le sud. Sa limite dépasserait alors le cap de Bonne-Espérance, permettant à ces espèces très dangereuses de coloniser l'océan Atlantique. D'ailleurs, un autre moyen d'expansion existe déjà, plus pernicieux encore, car incontrôlable : le transport par les ballasts de bateaux. Ses effets peuvent être dévastateurs, comme ce fut le cas en mer Noire, dans les années 1990, avec l'introduction fortuite du cténaire *Mnemiopsis leidyi*. L'animal s'est développé à une telle vitesse qu'en quelques années, il est devenu le plancton majoritaire, détrônant *Aurelia aurita* et achevant l'effondrement des stocks de poissons qu'elle avait entamé dans les années 1980, à la faveur de la pollution.

La liste n'est pas close de tous les mécanismes qui favorisent les méduses, d'autant que le cycle de vie n'est connu que pour 20 % du millier d'espèces recensées. Rien ne semble arrêter leur résistance et leur prolifération.

LE RADEAU DE LA MÉDUSE EN PLASTIQUE

Si la phase fixée sous forme de polypes préoccupe tant, c'est surtout parce que les polypes se fixent en priorité sur les supports en plastique. Une expérience réalisée en 1965 dans la rade de Villefranche-sur-Mer a montré que des plaques de polystyrène sont immédiatement colonisées par des polypes de méduses, qui créent vite une sorte de chevelure dense empêchant tout autre fixation. Jennifer Purcell, de l'Université de Washington Ouest, est parvenue à la même conclusion en 2007 en étudiant les préférences de substrat du polype d'*Aurelia labiata* ; elle recommande l'abandon de ce matériau dans les constructions portuaires ou littorales. Quand on connaît l'étendue du 7e continent – ces îlots de nos déchets plastiques qui dérivent dans les grands gyres océaniques –, on ne peut que s'inquiéter.

En fabriquant ce nouvel écosystème, cet inquiétant plastisphère, l'homme n'a-t-il pas joué à créer un nouveau *pelagos*, un monde destiné à dériver éternellement à la surface des flots ? Toutefois, à l'inverse des dieux grecs, il ne domine pas sa création, qui risque fort de perturber à jamais la quiétude des océans. ■

D'après L. Brotz et al., Increasing jellyfish populations : trends in large marine ecosystems, Hydrobiologia, vol. 690, pp. 3-20, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

R. CONDON *ET AL.* (éd.), **Jellyfish bloom research: advances and challenges,** *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, vol. 591, 2018.

R. CALCAGNO ET J. GOY, *Méduses. À la conquête des océans,* Éditions du Rocher, 2014.

K. A. PITT ET C. H. LUCAS (éd.), *Jellyfish Blooms,* Springer, 2014.

PH. CURY ET D. PAULY, *Mangetes méduses !,* Odile Jacob, 2013.

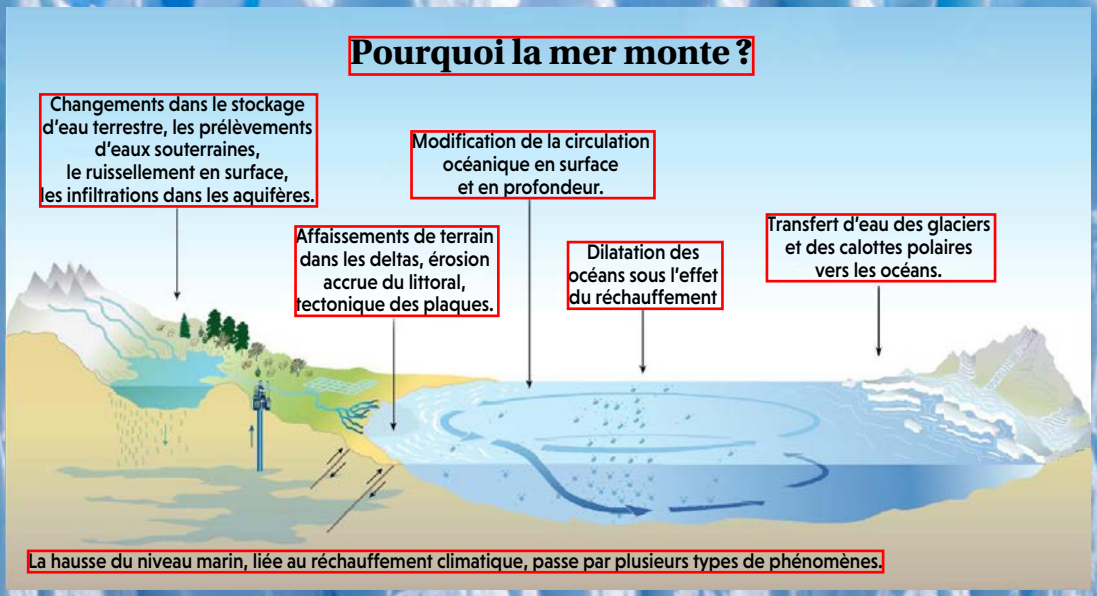
L.-A. GERSHWIN, Stung !, *Univ. of Chicago Press*, 2013.

J.-CL. BRACONNOT, Les salpes, reines du plancton marin, *Pour la Science*, n° 419, pp. 36-43, 2012.

Et pourtant, elle monte

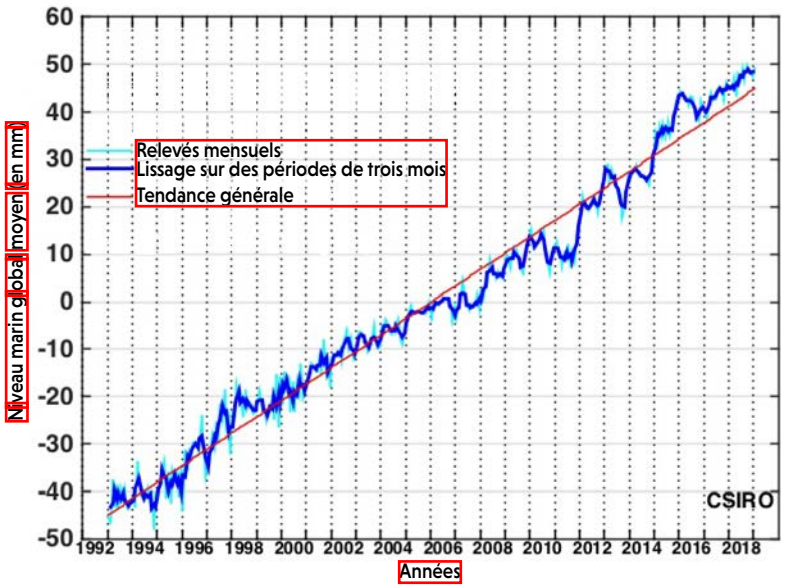
La hausse du niveau marin est une des nombreuses conséquences du dérèglement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre. L'ampleur du phénomène dépend de notre capacité à réagir. Ce sont donc plusieurs scénarios (notés RCP pour *representative concentration pathway*) qui ont été élaborés : par exemple, le RCP 8,5 correspond à l'absence de réduction des émissions de gaz à effet de serre ; dans le RCP 4,5, la réduction est modérée. Selon le premier, le niveau marin s'élèvera d'environ un mètre d'ici à 2100 et de près de 13 mètres en 2500 contre 32 centimètres et 5 mètres dans le deuxième scénario (RCP 4,5). À quoi ressembleront les continents ? Illustration par quelques exemples locaux, tirés de la carte interactive d'Alex Tingle, fondée sur les données de la Nasa : http://flood.firetree.net

Pourquoi la mer monte ?



La hausse du niveau marin, liée au réchauffement climatique, passe par plusieurs types de phénomènes.

© IPCC



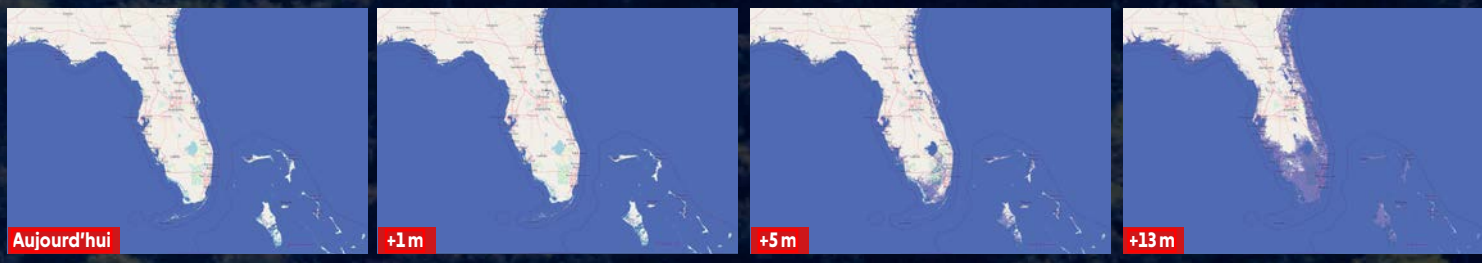
© CSIRO

Une hausse inexorable ?

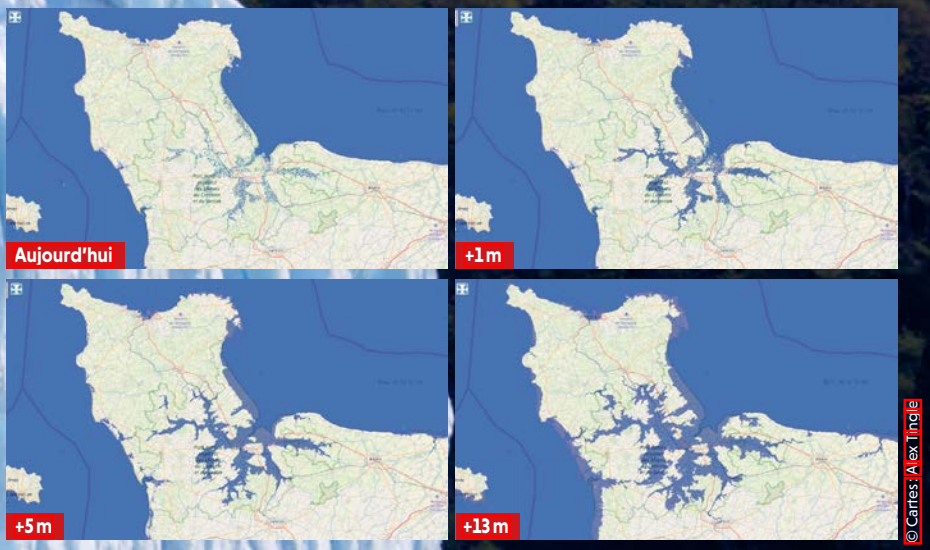
Les mesures faites par les satellites TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et Jason-3 montrent une montée constante de la mer, de janvier 1993 à janvier 2019. Les variations qui apparaissent sur les mesures mensuelles *(en bleu clair)* ont été lissées *(en bleu foncé)* pour plus de clarté. La tendance *(en rouge)* est de 3,4 millimètres par an.

© Sergey Rusakov/shutterstock.com

La Floride est réduite de moitié

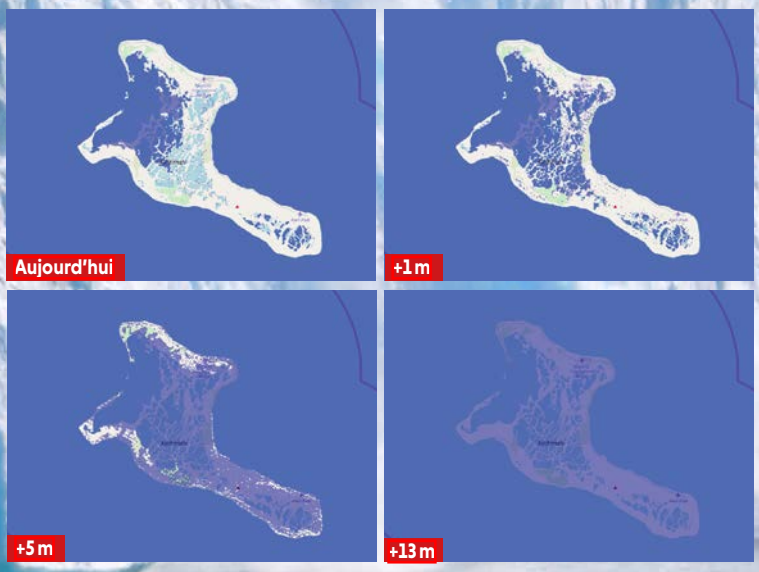


La Manche devient une île



© Cartes : Alex Tingle

Les Kiribati disparaissent



Les fonds des océans font grise mine

De grandes quantités de métaux jonchent les grands fonds océaniques et n'attendent que d'être récupérés. Mais cette exploitation, imminente, serait néfaste pour l'environnement. Peut-on limiter les dégâts ?

F**évrier 2018, à 50 kilomètres au large de San Diego, en Californie. Le navire océanographique *Sally Ride* flotte au-dessus de 1000 mètres d'eau.** À son bord, huit conteneurs grands comme une voiture familiale sont remplis de sédiments dragués au fond du Pacifique. Ils seront mélangés avec de l'eau de mer dans un énorme réservoir, puis réinjectés à 60 mètres de profondeur grâce à une conduite d'évacuation. Là, ils formeront un gros nuage de boue. Drôle d'idée !

L'objectif est de décrire la forme et la dynamique de ce nuage à l'aide d'un réseau de capteurs reliés au navire. Dans quel but ? Les données recueillies aideront à nourrir une réflexion générale sur l'exploitation minière en mer, une nouvelle industrie qui pourrait bientôt bouleverser les océans.

Depuis des années, plusieurs États et entreprises prospectent les grands fonds marins à la recherche de nickel, de cuivre, de cobalt et d'autres métaux de valeur. Parmi les différents types de gisement, les plus intéressants consistent en des accumulations, à plusieurs milliers de mètres de profondeur, de concrétions rocheuses de la taille du poing et riches en métaux : ce sont les nodules polymétalliques. >

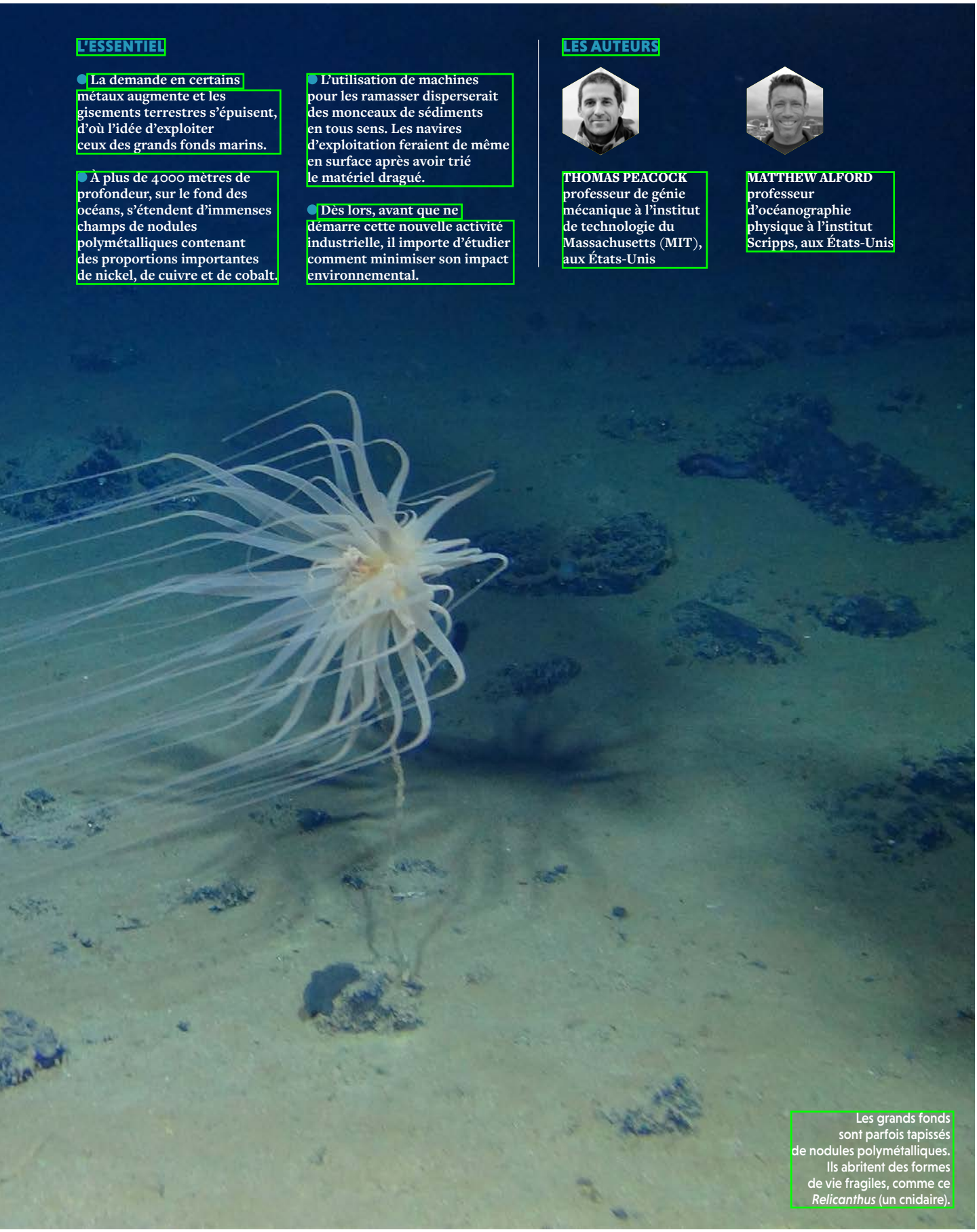
L'ESSENTIEL

- La demande en certains métaux augmente et les gisements terrestres s'épuisent, d'où l'idée d'exploiter ceux des grands fonds marins.
- À plus de 4000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, s'étendent d'immenses champs de nodules polymétalliques contenant des proportions importantes de nickel, de cuivre et de cobalt.
- L'utilisation de machines pour les ramasser disperserait des monceaux de sédiments en tous sens. Les navires d'exploitation feraient de même en surface après avoir trié le matériel dragué.
- Dès lors, avant que ne démarre cette nouvelle activité industrielle, il importe d'étudier comment minimiser son impact environnemental.

LES AUTEURS

THOMAS PEACOCK
professeur de génie mécanique à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis

MATTHEW ALFORD
professeur d'océanographie physique à l'institut Scripps, aux États-Unis



Les grands fonds sont parfois tapissés de nodules polymétalliques. Ils abritent des formes de vie fragiles, comme ce *Relicanthus* (un cnidaire).

© C. Smith & D. Amon, ABYSSLINE Project

Pour les récolter, les industriels imaginent des machines capables de travailler à ces profondeurs. Ces engins avanceraient lentement sur le plancher océanique en aspirant la couche supérieure qui contient les nodules, opération qui s'accompagnerait du relargage vers l'arrière d'un important nuage de sédiments. Les nodules remonteraient sur de grands navires par des tuyaux de plusieurs kilomètres de long. En triant le matériel prélevé, on obtiendrait des millions de nodules par jour. Les sédiments restants seraient renvoyés dans la mer où ils formeraient cette fois un nuage plongeant.

Quel impact une telle activité aura-t-elle sur les organismes vivant sur le plancher océanique et dans la colonne d'eau ? On comprend désormais mieux l'expérience décrite au début.

UNE DEMANDE CROISSANTE

Les mines terrestres à fortes teneurs commencent à s'épuiser. Pourtant, la demande ne fait qu'augmenter, du fait de l'accroissement démographique, de l'urbanisation, du développement rapide de technologies dépendant de certains métaux.

On estime par exemple que la demande mondiale annuelle de nickel – environ 2 millions de tonnes actuellement – devrait augmenter de 50% d'ici à 2030. Les gisements terrestres en contiendraient encore environ 76 millions de tonnes. Or, à elle seule, la zone de fracture de Clarion-Clipperton, c'est-à-dire la plaine abyssale s'étendant de Hawaï à la Basse-Californie, en contient à peu près autant ! Pour le cobalt, la situation est similaire : les réserves terrestres sont évaluées à environ 7 millions de tonnes, mais les nodules de cette même zone de fracture en contiennent autant voire plus. C'est pourquoi plusieurs entreprises, telles que la GSR (la société belge *Global Sea Mineral Resources*) ou la société anglaise *UK Seabed Resources*, se tournent vers l'exploitation minière en mer profonde, qu'elles espèrent moins coûteuse à terme.

Simultanément, certains pays disposant de peu de ressources minérales terrestres, comme le Japon et la Corée du Sud, veulent déjà prospecter les océans à la recherche de gisements. Ils ont donc commencé par explorer leur zone économique exclusive (ZEE). En septembre 2017, la Jogmec (*Japan Oil, Gas and Metals National Corporation*) a ainsi effectué dans les eaux territoriales nippones l'un des premiers essais à grande échelle. Une excavatrice prototype a récolté des tonnes de zinc et d'autres métaux en plusieurs endroits situés à 1600 mètres de profondeur, au large d'Okinawa.

LA PLUPART DES PROJETS D'EXTRACTION EN EAU PROFONDE CONCERNENT LES NODULES POLYMÉTALLIQUES

De petites nations insulaires, comme les Tonga et les Îles Cook, ont des ressources trop limitées pour développer elles-mêmes une telle industrie. Elles négocient donc des droits d'exploitation minière à l'intérieur de leurs zones économiques exclusives. S'agissant du plancher océanique sous-jacent aux eaux internationales, c'est l'Autorité internationale des fonds marins, ou AIFM (ISA en anglais), communément appelée l'« Autorité », qui l'administre depuis Kingston, en Jamaïque. Pour le moment, l'Autorité a accordé 28 permis d'exploration à des organismes de 20 pays.

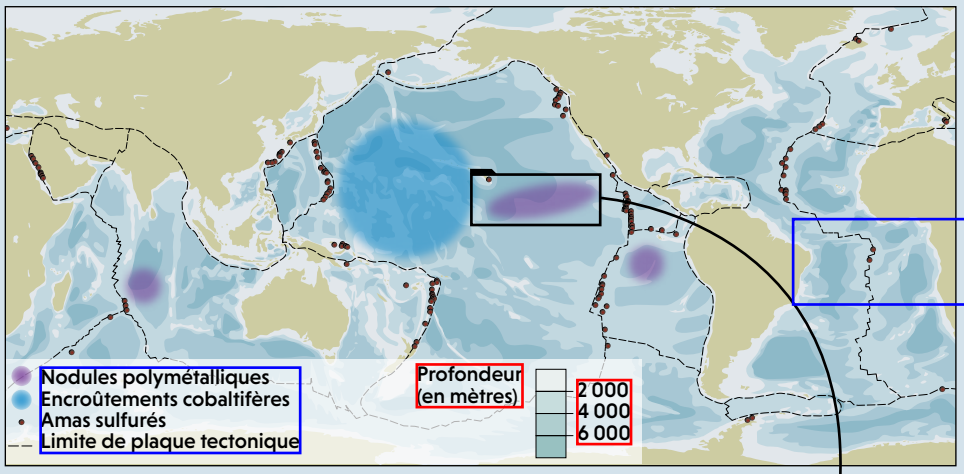
Pendant que les entreprises prospectent les ressources, les chercheurs s'efforcent d'en savoir le plus possible sur les éventuels effets destructeurs de la nouvelle industrie et de déterminer dans quelle mesure on pourrait les réduire. Des gouvernements, des industriels, l'AIFM, des universités et des organismes scientifiques (en France, l'Ifremer et le CNRS) s'associent afin de lancer et de mener les projets de recherche nécessaires.

Trois types de gisement sont prometteurs. Le premier est celui des « amas sulfurés ». Il s'agit d'accumulations de sulfures métalliques (FeS_2, PbS, Au_2S...) créées par les sources hydrothermales présentes sur les dorsales océaniques, ces longues chaînes volcaniques sous-marines qui marquent la frontière entre deux plaques tectoniques. Les amas sulfurés contiennent des masses notables de zinc, de plomb et d'or. La Papouasie-Nouvelle-Guinée a accordé à la société canadienne *Nautilus Minerals* un permis d'extraction de ces sulfures sur le site hydrothermal inactif de Solwara 1. De son côté, l'AIFM a émis sept permis d'exploration sur des sites d'anciennes sources hydrothermales se trouvant dans les eaux internationales. Les scientifiques ont, eux, demandé un moratoire pour les sites actifs, afin de protéger leurs écosystèmes uniques.

Le deuxième type de gisement intéressant est celui des encroûtements cobaltifères. Le contact entre les courants marins et les flancs ou sommets de montagnes sous-marines entraîne en effet la précipitation des métaux contenus dans l'eau de mer. Cela finit par créer des amas considérables : même s'ils ne grossissent que de quelques millimètres par million d'années, ils finissent par atteindre des épaisseurs de 5 à 10 centimètres. Outre du cobalt, ces amas contiennent du nickel et d'autres métaux intéressants. L'AIFM a émis quatre permis d'exploration pour l'Ouest du Pacifique, mais l'extraction de ces encroûtements cobaltifères sera un défi : il est difficile de les arracher au substrat rocheux, tandis que

CHASSE AU TRÉSOR

De nombreux pays et entreprises exploitent les fonds marins peu profonds à la recherche de pétrole, de sable et de diamants. Nombre d'entre eux se sont aussi mis à prospecter les grands fonds à la recherche de métaux critiques, tels le nickel et le cobalt. Les chercheurs ont cartographié dans les eaux internationales trois types de gisement qui semblent particulièrement prometteurs (régions colorées). Sur le plan économique, ce sont les nodules polymétalliques, que l'on nomme aussi des nodules de manganèse, qui pourraient être les plus intéressants.

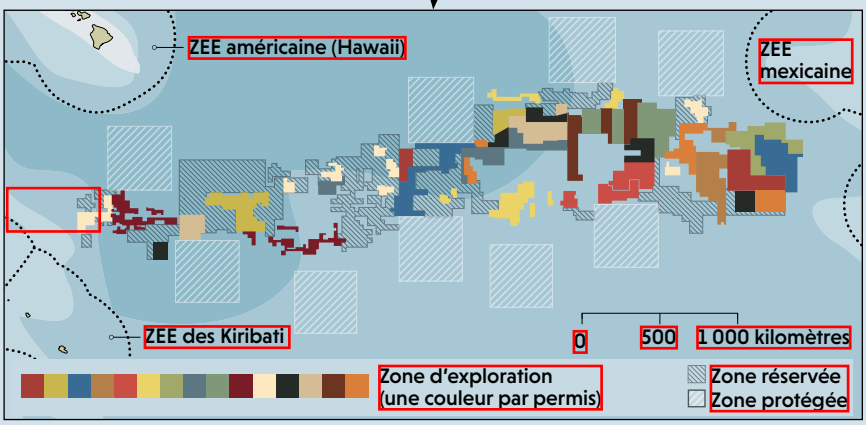


CONCENTRATIONS MÉTALLIQUES DANS LES FONDS MARINS

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) réglemente l'exploitation minière dans les eaux internationales. Cet organisme a déjà émis 16 permis d'exploration *(ci-dessous)* à la recherche de nodules de manganèse dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton, une région du plancher de l'océan Pacifique grande comme l'Europe. L'essentiel de ces concrétions rocheuses se trouve à une profondeur de plus de 4 000 mètres.

PERMIS D'EXPLORATION

Quand l'AIFM accorde un permis, elle définit des zones réservées à une exploitation future par des pays en développement, et des zones protégées où aucune extraction ne peut avoir lieu. Certains pays mènent également des recherches dans leur propre zone économique exclusive (ZEE), c'est-à-dire l'espace maritime qu'ils ont le droit d'exploiter.



© D'après World Ocean Review 1, Maribus, 2010 ; Banisphère ; AIFM ; Base de données de S. Claus et al., Flanders Marine Institute, consultée sur www.marineregions.org le 24/11/2016 (carte des permis d'exploration)

les pentes abruptes où ils se trouvent constituent un terrain difficilement praticable.

RUÉE VERS LES NODULES

Dès lors, la plupart des projets d'exploration minière en eau profonde portent sur le troisième type de gisement : les nodules polymétalliques. On les nomme aussi nodules de manganèse, parce que ce métal y domine. Dans de nombreuses régions du plancher océanique, ils jonchent le fond, à moitié enterrés dans les sédiments. Leur formation est très lente : sur un quelconque morceau de matière détritique, parfois une dent de requin, les métaux contenus dans l'eau se mettent à précipiter, formant un noyau dont le diamètre augmentera ensuite d'environ 1 centimètre par million d'années.

À ce jour, l'AIFM a accordé 16 permis d'exploration à la recherche de nodules dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton. Bien que les proportions varient d'un endroit à l'autre, un nodule contient typiquement 3 % de son poids en nickel, en cuivre et en cobalt ; c'est cela qui fait son prix, bien plus que les 25 % de manganèse qu'il contient aussi. Le reste est du matériau durci sans intérêt économique.

L'évaluation de l'intérêt minier d'un site potentiel à l'aide d'instruments et de collecteurs d'échantillons embarqués dans des véhicules autonomes sous-marins prend plusieurs mois. En raison de l'étendue des surfaces à explorer, on extrapole les résultats de >

l'échantillonnage sur l'ensemble du champ pressenti. Un site passe pour économiquement viable s'il promet au moins 10 kilogrammes de nodules par mètre carré, si peu ou pas de sédiments les recouvrent et si la pente du fond océanique est inférieure à 10%, afin que les machines collectrices, roulant sur de lourdes chenilles, puissent s'y déplacer sans trop de difficulté.

L'outil crucial de l'extraction minière sous-marine est la machine collectrice, alimentée par un câble électrique relié au navire. Elle doit être conçue pour exploiter la couche superficielle du fond océanique sur environ 50 kilomètres par jour, sans doute par allers et retours à l'intérieur d'une bande large d'un kilomètre. Des véhicules sous-marins autonomes aideraient à guider l'engin et à explorer les environs immédiats.

Après avoir aspiré ou ramassé à la pelle les nodules et les sédiments qui les accompagnent, la machine effectuerait un tri grossier en expulsant derrière elle le plus possible de boue. Un long tube équipé d'une série de pompes ferait ensuite remonter le matériau issu de ce premier tri jusqu'à un navire de traitement; les industries gazière, pétrolière et de dragage utilisent déjà couramment ce type de colonne ascendante. Le navire séparerait les nodules et renverrait le reste des sédiments dans l'océan par un tuyau d'évacuation. De gros navires minéraliers achemineraient ensuite les nodules jusqu'à une usine de traitement située à terre, qui en extrairait les métaux.

SOUS L'ÉGIDE DES NATIONS UNIES

Pour que cette collecte soit économiquement rentable, les entreprises minières devront ramasser 3 millions de tonnes de nodules par an, soit environ 37000 tonnes de nickel, 32000 tonnes de cuivre, 6000 tonnes de cobalt et 750000 tonnes de manganèse.

L'AIFM a été instaurée sous l'égide de la CNUDM, c'est-à-dire de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer. Celle-ci stipule notamment qu'une nation signataire doit prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger l'environnement marin. L'AIFM accorde des permis d'exploration par zones de 150000 kilomètres carrés. Comme les pays ayant ratifié la CNUDM ou l'ayant rejointe (167 États et l'Union européenne) considèrent le fond des océans comme une ressource «pour le patrimoine commun de l'humanité», toute entreprise ou organisme qui souhaite y pratiquer une activité minière doit être parrainé par un pays ayant ratifié la CNUDM. Une fois les études prospectives faites, l'entreprise divise chaque parcelle en deux moitiés, dont l'une est choisie par l'Autorité et réservée pour une exploitation éventuelle par un pays en développement.

Les études suggèrent que sur une parcelle de 75000 kilomètres carrés alloués, une entreprise ne trouvera vraisemblablement que 10000 kilomètres carrés exploitables économiquement (soit environ 0,2% de la zone de fracture de Clarion-Clipperton).

Des nodules de manganèse contenant des métaux économiquement intéressants sont remontés du fond du Pacifique au cours d'une mission d'échantillonnage de la société canadienne *Nautilus Minerals*.

La machine collectrice aspirerait les 10 à 15 centimètres superficiels du fond de l'océan et compacterait le plancher océanique partout où elle passerait. Or une grande diversité d'organismes d'une taille dépassant la cinquantaine de micromètres vit dans les nodules ou dans les sédiments. La plupart de ces organismes ne résisteront pas au prélèvement de la couche superficielle du fond ou au nuage de sédiments qui se redéposera.

Des microorganismes plus petits, notamment des bactéries, constituent le reste de la biomasse. On ne sait pas exactement ce qui arrivera à ces minuscules espèces. Projetées

© Nautilus Minerals

vers le haut avec les sédiments, elles se redéposeront au fond quelques kilomètres plus loin. Celles dont l'existence dépend des nodules auront sans doute du mal à survivre. Comme les nodules mettent des millions d'années à se former et que, dans l'océan profond, les communautés biologiques éloignées des évents hydrothermaux sont très lentes à se développer, il est probable que les régions exploitées ne retrouveront pas leur état antérieur avant une durée bien plus longue que la vie humaine.

Ainsi, il y a près de 30 ans, des chercheurs allemands ont utilisé un traîneau pour simuler le dragage le long d'un chemin d'extraction; quand les lieux ont été revisités en 2015, les traces de passage de l'engin semblaient encore toutes fraîches.

L'impact du nuage de sédiments émis par la machine collectrice est un autre sujet de préoccupation. Des courants de quelques centimètres par seconde parcourent le fond de l'océan; ils pourraient emporter les particules à plusieurs kilomètres du lieu d'extraction. Majoritairement très fines, avec un diamètre de l'ordre de 0,02 millimètre, ces particules sédimentent à une vitesse d'environ 1 millimètre par seconde. Comme les nuages de sédiments émis par les machines atteindront une dizaine de mètres de haut au sein des courants de fond, ces particules pourraient être déplacées d'une dizaine de kilomètres de leur lieu d'émission.

SUIVRE LES NUAGES

Cette estimation est peut-être trop simpliste, car les particules fines ont tendance à floculer, c'est-à-dire à former des agrégats se déposant plus vite que les particules isolées, ce qui limite l'étendue des nuages. Mais comme le taux de sédimentation dans les grands fonds est extrêmement faible, de l'ordre du millimètre par millier d'années seulement, les biologistes pensent que même le dépôt de très faibles quantités de sédiments émis par les machines collectrices suffirait à étouffer la vie sur le plancher océanique jusqu'à des distances dépassant la dizaine de kilomètres.

Le compactage du fond par le passage de la machine collectrice est aussi un problème. L'étude des effets des tempêtes abyssales qui, de temps à autre, raclent les sédiments des grands fonds fournira peut-être des éléments d'information précieux à cet égard.

Quant à l'impact des nuages de sédiments relâchés par les navires sur l'environnement marin et son écologie, il est très difficile à évaluer. Les courants qui animent les couches supérieures de l'océan sont plus rapides et plus turbulents. La conduite rejetant les sédiments pourrait descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Elle émettra un nuage de forme plus ou moins conique, qui sera dilué et distordu par les courants, puis transporté sur plusieurs kilomètres par jour.

Au cours de l'expérience que nous avons menée au large de San Diego en février 2018, nous avons suivi le nuage à l'aide de plusieurs instruments. Nous avons constaté que les courants océaniques le rendaient sinueux, et observé la formation de filaments entremêlés. Un appareil sous-marin et remorqué en a prélevé des échantillons. Nous analysons les données recueillies afin d'en tirer les principales informations, telles que les concentrations en sédiments à proximité ou à distance de la conduite.

PLUS DE 25 ANS APRÈS LE PASSAGE D'UN TRAÎNEAU SUR LE FOND MARIN, LES TRACES SEMBLAIENT ENCORE TOUTES FRAÎCHES

Les chercheurs tentent aussi de savoir dans quelle mesure la destruction de la vie dans une zone minière affectera les écosystèmes locaux, ainsi que les communautés abyssales adjacentes ou distantes de plusieurs kilomètres. Au sein de la zone de fracture de Clarion-Clipperton, l'AIFM a décidé de protéger neuf grandes régions et travaille aussi à l'établissement de zones protégées au sein de chaque zone contractuelle. Des spécialistes surveilleront en outre ces sanctuaires afin d'évaluer l'impact de l'extraction.

Il importe aussi de comparer les avantages et inconvénients de l'extraction minière en mer et sur terre. En République démocratique du Congo, qui fournit 60% du cobalt utilisé sur la planète, l'exploitation minière se traduit par de la déforestation et de la pollution atmosphérique, sans parler de l'exploitation des enfants dans les mines. Dans certains pays, les entreprises qui extraient le minerai de nickel sont en train d'épuiser les gisements faciles d'accès, et se tournent vers des gisements dont l'exploitation exige plus d'énergie et davantage de traitements chimiques, et qui aura donc un plus fort impact environnemental.

L'impact des usines exploitant les nodules doit aussi être considéré. Si un nodule ne renferme que 30% de métaux intéressants, le reste constitue du déchet, généralement sous forme de boue. Aujourd'hui, les usines de traitement des minerais renvoient ces boues dans la mine d'où elles ont été tirées. Mais on ne saura pas quoi faire de celles produites par l'exploitation de millions de nodules océaniques. D'un autre côté, l'extraction minière marine présente l'avantage de ne laisser sur place aucune infrastructure lorsqu'un navire d'extraction quitte une zone pour une autre. Il n'en va pas de >

ET LA FRANCE DANS TOUT CELA ?

Dans les années 1970, la France a été pionnière dans la découverte des sources hydrothermales métallifères et dans l'exploration des zones à nodules de la zone de fracture de Clarion-Clipperton (CCFZ), située dans le Pacifique Nord équatorial.

L'exploration du fond de l'océan à la recherche de gisements métallifères a ensuite connu un fort ralentissement en raison de la situation sur le marché des métaux. Puis, dans les années 2000, l'intérêt pour les trois types de ressources minérales marines profondes – les nodules polymétalliques dans les plaines abyssales, les amas sulfurés le long des dorsales océaniques et des bassins proches des arcs volcaniques, et les encroûtements cobaltifères sur les pentes des monts sous-marins – est revenu.

C'est pourquoi, dans le cadre de la stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins, l'État français patronne l'Ifremer (l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), qui a signé deux contrats d'exploration des ressources minières en océan profond avec l'Autorité internationale pour les fonds marins (AIFM), et en assure la gestion.

Signé en 2001, le contrat d'exploration des nodules dans la zone de Clarion-Clipperton concerne les nodules polymétalliques dans un secteur de 75000 kilomètres carrés et court jusqu'en 2021. Les recherches effectuées sur la zone dans les années 1970 et 1980, puis pendant les 15 premières années du contrat, ont permis d'aboutir à une première estimation de la ressource, ainsi qu'à une meilleure connaissance de l'écosystème benthique. Les recherches se concentrent aujourd'hui sur les impacts qu'aurait une exploitation, notamment sur la vie marine profonde.

Quelques exemples de nodules polymétalliques rapportés de l'océan profond. Une telle concrétion contient typiquement 25 % de son poids en manganèse et 3 % en cobalt, en cuivre et en nickel.

Signé en 2014, le contrat d'exploration des sulfures a été signé pour 15 ans. Il vise à explorer les sulfures polymétalliques d'une zone de la dorsale médioatlantique localisée entre 21° N et 26° N, par une profondeur moyenne de 3400 mètres. Les travaux d'exploration menés ont pour objectifs l'évaluation des minéralisations, la recherche de sites hydrothermaux, l'évaluation de la biodiversité et des facteurs environnementaux.

Une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales profondes a été menée

Pour compléter cet appui à la puissance publique, l'Ifremer explore aussi des grands fonds, y mène des recherches sur la formation des ressources minérales et développe des technologies de reconnaissance, d'observation et d'intervention sous-marine à plusieurs échelles. Avec le CNRS, il a aussi réalisé une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes (*voir la bibliographie page ci-contre*). L'institut a par ailleurs participé à un projet de recherche européen intitulé « Aspects écologique de l'activité minière en mer profonde » (*Ecological aspects of deep-sea mining*), qui visait à évaluer les impacts à long terme d'une exploitation des nodules polymétalliques sur l'environnement profond. La suite de cette action pilote s'articulera autour du suivi environnemental du test d'un prototype de collecteur de nodules prévu par le contractant belge GSR-Deme en 2019 dans la CCFZ.

Afin de mieux comprendre les organismes vivants autour des sources hydrothermales, leur cycle de vie, leur capacité de dispersion...., l'Ifremer pilote aussi un projet de recherche en collaboration avec l'université Pierre-et-Marie-Curie, le Muséum national d'histoire naturelle et l'Institut océanographique méditerranéen. Deux campagnes scientifiques ont déjà été réalisées en 2014 et 2018 (*Bicose 1 & 2*) sur le site du permis sulfures.

Enfin, en collaboration avec le CNRS et dans le cadre de l'infrastructure européenne Emso-Eric, l'Ifremer pilote le fonctionnement d'un observatoire du fond marin au sud des Açores sur le champ hydrothermal Lucky Strike. Cet observatoire est opéré depuis 2010 et vise à acquérir des séries temporelles de données sur les processus hydrothermaux, tectoniques, volcaniques et les écosystèmes d'un site hydrothermal actif de la dorsale médioatlantique.

PIERRE-MARIE SARRADIN ET SÉBASTIEN YBERT IFREMER

© Bretf Stevens

même à terre, où d'anciennes installations minières encombrent partout le paysage…

Afin de diminuer les besoins en minerais et les impacts environnementaux associés, il est essentiel que la société développe à l'échelle planétaire un recyclage efficace des métaux. Pour autant, la récupération ne suffira pas à satisfaire la demande, qui est en augmentation constante. Il est aujourd'hui difficile de dire si, à quantité de minerai équivalente, l'exploitation du plancher océanique aura des conséquences environnementales plus graves que celles de l'extraction terrestre.

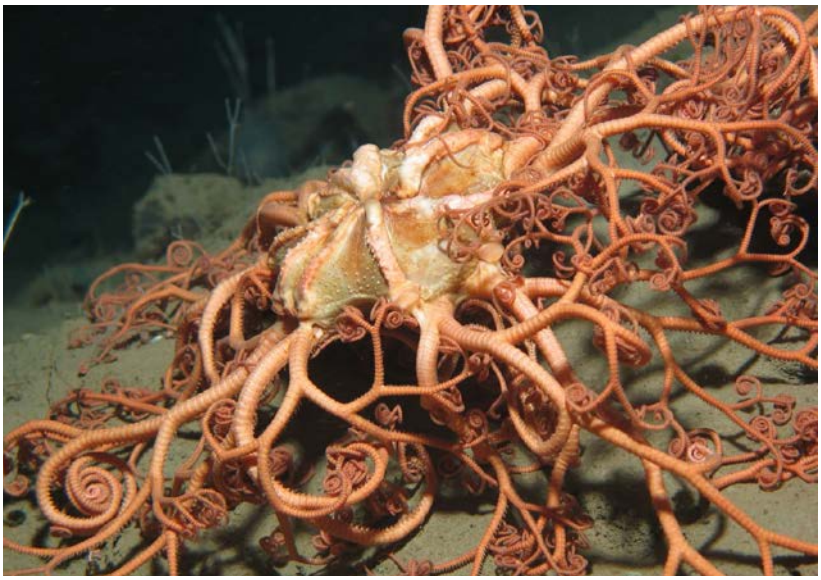
Bien entendu, la régulation des activités minières aura un effet sur ce bilan. L'AIFM ne dispose pas de navires pour inspecter les exploitations, de sorte qu'elle partage cette responsabilité avec les nations parrainant les entreprises minières. Elle ne peut que révoquer le permis d'un pays ou d'une entreprise, suspendre les opérations ou imposer une amende si elle parvient à la conclusion que les opérations minières menées dans une zone ne respectent pas les normes environnementales.

Quatorze des pays membres des Nations unies ont signé la CNUDM, mais ne l'ont pas ratifiée (dont les États-Unis), et 15 autres membres ne l'ont pas signée. Ces 29 États pourraient essayer d'exploiter les eaux internationales sans respecter les règles de l'AIFM, laquelle devrait alors s'en remettre à la diplomatie internationale pour régler le litige.

L'organisation a publié une ébauche de la réglementation qu'elle prévoit pour l'exploitation minière dans les eaux internationales. Les règles correspondantes visent à tout couvrir à terme, de l'émission d'un permis d'exploration et d'exploitation jusqu'aux mesures à prendre pour protéger l'environnement marin. L'AIFM prévoit l'entrée en application de ces règles d'ici à 2020. Quant à l'activité dans les usines terrestres de traitement des nodules, sa régulation relèvera des pays les accueillant.

UN CAUCHEMAR BIENTÔT RÉALITÉ ?

Un autre aspect important de la problématique posée par l'émergence d'une industrie minière en mer est l'exploitation au sein des zones économiques exclusives des différents pays. Certains pays n'ont pas de mers profondes dans cette zone qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques (370 kilomètres) à partir de la côte. D'autres en ont beaucoup, en particulier les États insulaires du Pacifique. Certains pays, telle la République des Palaos, ont purement et simplement rejeté l'exploitation minière de leur plancher océanique. D'autres, tels les Tonga, les Kiribati et les Îles Cook, mettent une régulation en place et recherchent des partenaires industriels. Les Îles Cook ont par exemple signé un contrat avec la société américaine *Ocean Minerals*, qui accorde à l'entreprise la priorité quant à la prospection à la recherche de nodules cobaltifères de ses 23 000 kilomètres carrés de zone économique exclusive.



© SERPENT Project/DOB Jones

L'étoile *Gorgonocephalus caputmedusae* fera-t-elle les frais de l'exploitation minière en eaux profondes ?

L'exploitation minière des grands fonds marins est ainsi sur le point de devenir une réalité. Étant donné son intérêt économique et stratégique croissant, certains États pourraient lancer une exploitation pilote dans les 5 à 10 prochaines années. Il est souhaitable dans cette perspective que toutes les parties concernées coopèrent, comme elles l'ont fait jusqu'à présent, les essais industriels à petite échelle se faisant conjointement aux indispensables recherches scientifiques.

De fait, une grande partie de ce que nous savons des écosystèmes et des ressources dans les zones économiques exclusives est le fruit d'études menées en conjonction avec les entreprises. Notre expédition de San Diego, par exemple, a été financée par l'institut de technologie du Massachusetts, l'institut Scripps d'océanographie en collaboration avec l'Autorité internationale des fonds marins, l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) et l'entreprise GSR. En 2019, le projet européen *JPI Oceans* effectuera une étude dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton en collaboration avec l'AIFM et GSR.

Certaines des directives et normes à appliquer dans l'exploitation commerciale pourraient être inspirées des règles relatives à des industries existantes, et d'autres créées. Si les différents acteurs en présence parviennent à collaborer, l'exploitation minière du plancher océanique sera une référence éthique, puisque, jusqu'à présent, la réglementation n'a été établie qu'après la mise en exploitation d'une ressource naturelle. Nous pouvons cette fois réfléchir et réguler avant d'exploiter à tort et à travers. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. DYMENT *ET AL.* (coord.), Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes, Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, *CNRS-Ifremer*, 2014 http://bit.ly/Ifre-Nodu

Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule Province: Predicting and managing the impacts of deep seabed mining, *Étude technique de l'AIFM* n°3, *AIFM*, 2008.

Site de l'AIFM: www.isa.org.jm

Expérience Plumex de l'institut Scripps d'océanographie: www.mod.ucsd.edu/plumex

À bout de souffle

Dans les océans, s'étendent d'immenses zones appauvries en oxygène. La raison ? Le changement climatique et la pollution. Et les conséquences pour l'écosystème marin sont dévastatrices !

© Christian Ronneger

L'ESSENTIEL

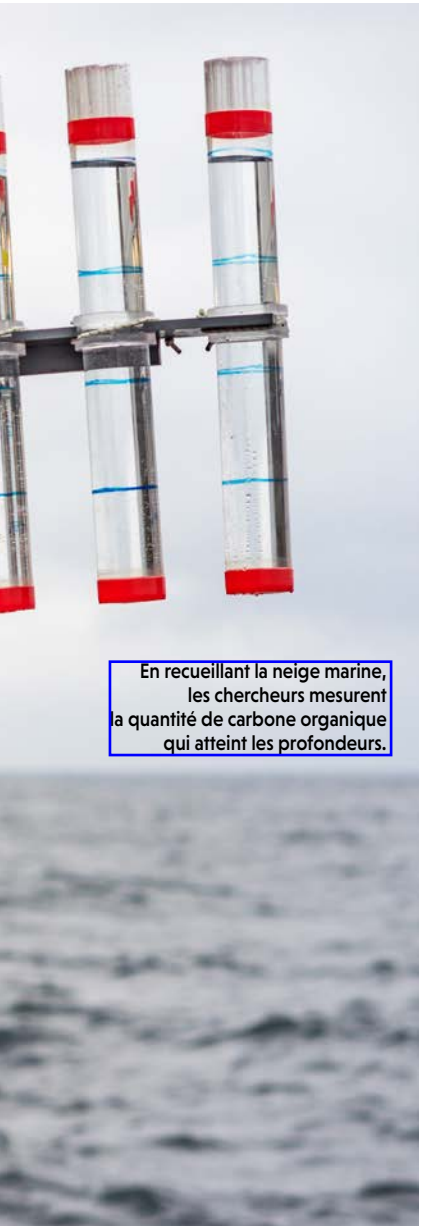
- Au gré des courants et de l'activité biologique, des régions entières de l'océan s'appauvrissent en oxygène.
- Dans ces zones (notées OMZ), un équilibre s'est installé entre l'apport en oxygène et la consommation.
- Le réchauffement climatique et le déversement de polluants, *via* les fleuves ou l'atmosphère, perturbent cette situation.
- En conséquence, des régions totalement dépourvues d'oxygène apparaissent et s'étendent toujours plus.
- La faune, du plancton aux poissons, a du mal à s'adapter.

LES AUTEURS

CLARISSA KARTHÄUSER est doctorante à l'institut Max-Planck de microbiologie marine à Brême, en Allemagne.

ANDREAS OSCHLIES est professeur au centre Helmholtz d'océanographie à Kiel, en Allemagne.

CHRISTIANE SCHELTEN coordonne les recherches sur les interactions climato-biogéochimiques dans l'océan tropical au centre Helmholtz d'océanographie.



En recueillant la neige marine, les chercheurs mesurent la quantité de carbone organique qui atteint les profondeurs.

I neige sur le fond des océans! Cette « neige marine » est une pluie d'agrégats se déposant dans les profondeurs. De quoi est-elle composée ? D'un mélange de microorganismes morts, ou mourants, de déjections de poissons, de sable, de suie… Au fond, ils sont dégradés par des bactéries qui utilisent le peu d'oxygène disponible. Mais quand ce gaz vient à disparaître, s'il n'est plus délivré en quantité suffisante par les courants, une zone hypoxique voire anoxique se développe. Et la neige recouvre alors une zone morte…

Des études récentes suggèrent que la teneur en oxygène de la mer a diminué ces dernières décennies, et cette tendance devrait se poursuivre. Les coupables en sont le changement climatique et des apports importants en nutriments. Par quels mécanismes ? Le réchauffement ralentit le mélange des océans et diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Quant aux nutriments, ils arrivent toujours plus nombreux dans la mer, déversés par les industries, l'agriculture, les eaux usées… Conséquence : une croissance massive des algues et une consommation accrue de l'oxygène lors de la dégradation de la biomasse morte.

Comment vont évoluer les zones déjà pauvres en oxygène ? Des régions, déjà hypoxiques, basculeront-elles vers l'anoxie ? Que nous apprend à ce sujet l'histoire de la Terre ? Suivons à la trace l'oxygène dans la mer.

L'oxygène n'est pas réparti uniformément dans l'océan. On en trouve de grandes concentrations près de la surface, où les algues, par la photosynthèse, en libèrent même plus que l'eau ne peut en stocker. Ces eaux de surface sont riches en oxygène même la nuit, alors que la photosynthèse est éteinte, grâce à un échange constant avec l'atmosphère.

Par les courants marins et des processus de mélange, l'eau de surface atteint des zones plus profondes, là où des microorganismes dégradent le matériel organique qui y coule, c'est la neige marine. La quantité d'oxygène apportée par l'eau dépend surtout de sa température avant qu'elle ne plonge ; en effet, l'eau chaude absorbe moins d'oxygène que l'eau froide. Pour preuve, on trouve de grandes concentrations de ce gaz dans la mer du Labrador, entre le Canada et le Groenland, là où une grande partie des eaux profondes de l'Antarctique prend sa source.

LE RÈGNE DE LA PHYSIQUE

Ce mouvement de plongée est dicté par la physique : les eaux refroidies sont plus denses et coulent. L'eau profonde revient au contact de l'atmosphère, dans les zones de remontée tropicales et subtropicales (*voir la figure page suivante*). C'est le schéma de la circulation thermohaline qui parcourt tous les océans du globe, un tour du monde par ce biais prenant environ 1 000 ans.

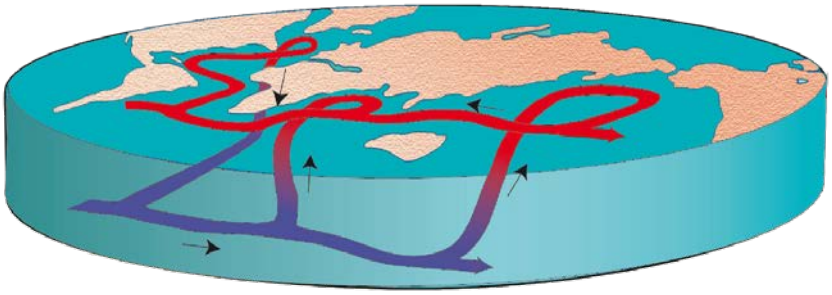
Pendant son voyage, la composition chimique de l'eau change, car il « neige » continuellement de la biomasse morte depuis les zones peu profondes. Et les microorganismes qui s'en nourrissent prélèvent toujours plus d'oxygène. Simultanément, le CO_2 et les nutriments que les algues en surface avaient >

fixés sont relâchés. Lorsqu'elle passe dans l'Atlantique, l'eau du fond de la mer du Labrador est plus riche en oxygène que dans le Pacifique nord et l'océan Indien.

Les eaux des profondeurs, aux abords des côtes occidentales des continents africain et américain, sous les tropiques, remontent de nouveau. C'est la conséquence des vents parallèles aux côtes qui poussent l'eau de surface vers l'équateur. En raison de la force de Coriolis, cette eau est déviée au large, ce qui entraîne la remontée de l'eau des couches profondes. Cette dernière est riche en nutriments (nitrates, phosphates…), ainsi qu'en oligoéléments comme le fer. La croissance du phytoplancton en est favorisée.

Une partie des algues qui se multiplient est ingérée par le zooplancton et par des poissons (sardines, anchois…). L'autre partie coule dans des couches plus profondes et y meurt, faute de lumière nécessaire à la photosynthèse. Les restes laissés par les prédateurs et leurs déjections s'enfoncent eux aussi. Le matériel organique s'enchevêtre et s'agglomère en de plus gros agrégats, formant des flocons de neige marine qui mesurent parfois plusieurs millimètres.

Les microorganismes qui sont établis sur les flocons et d'autres qui nagent librement entraînent, par leur métabolisme, une plus grande consommation d'oxygène sous la zone où la photosynthèse est possible. Dans ces zones, il n'y a pas non plus de mélange suffisant, si bien que l'oxygène se raréfie.



La circulation thermohaline consiste en un déplacement, une sorte de tapis roulant, de l'eau en raison des variations de température et de salinité. Les eaux chaudes cheminent en surface, remontent l'Atlantique, se refroidissent, plongent, parcourent le trajet inverse en profondeur et remontent en surface dans l'océan Indien et dans l'océan Pacifique.

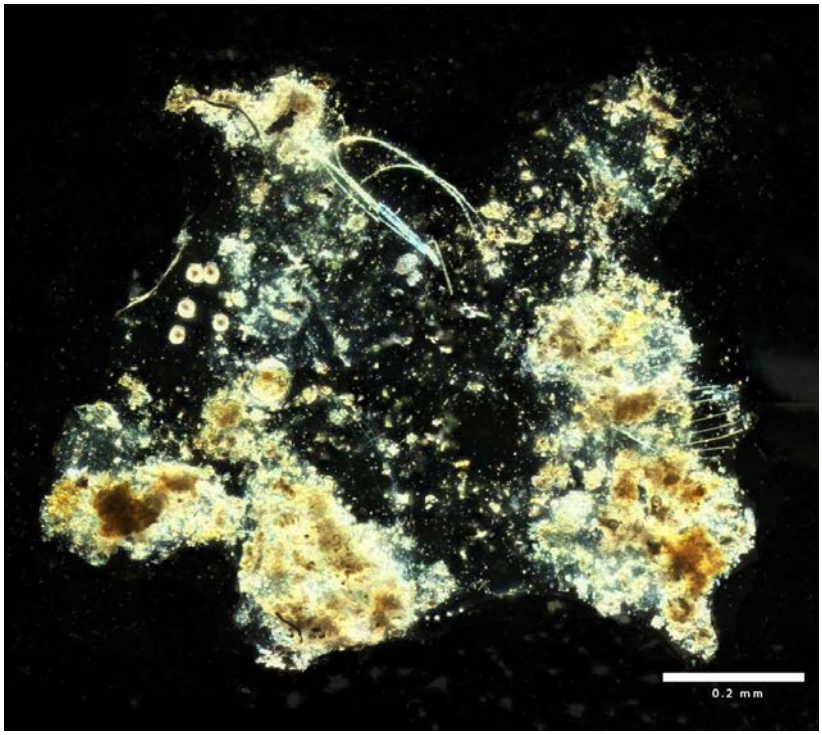
C'est ainsi qu'apparaissent, entre 50 et 1 000 mètres de profondeur, des zones de minimum d'oxygène (ZMO ou OMZ pour l'anglais « Oxygen minimum zone »), parfois nommées zones d'ombre.

LE VAMPIRE DES ZONES MORTES

On trouve des concentrations particulièrement faibles en oxygène, cet élément si important pour la vie, près des côtes du Pérou, du Chili, de la Namibie ainsi que dans le nord de l'océan Indien. C'est aussi le cas dans d'autres régions où circulent des courants faibles, des régions côtières avec de forts apports de nutriments depuis la terre ou dans les mers intérieures. Un exemple, la mer Baltique dans laquelle les fleuves apportent de grandes quantités d'azote d'origine agricole dont profitent les algues. En outre, on trouve dans cette mer une couche stable composée d'une eau de surface chaude et pauvre en sel et, plus bas, d'une eau plus froide et plus salée, qui ne se mélangent presque pas. L'oxygène n'atteint pas les profondeurs.

L'oxygène a aujourd'hui totalement disparu du centre de la plupart des OMZ, au Pérou par exemple. Un écosystème particulier s'y développe: des microbes anaérobies prospèrent, grâce à un métabolisme qui ne nécessite pas, ni même parfois ne tolère, d'oxygène. La plupart des autres animaux ne peuvent survivre longtemps dans ces couches d'eau; ce sont des zones mortes.

Pourtant, elles ne sont pas désertes. Certains organismes se sont adaptés à la teneur très basse en oxygène et s'y protègent des prédateurs. C'est le cas de *Euphausia mucronata*, le type de krill le plus courant dans la zone de remontée des eaux (on parle aussi de *upwelling*) du courant de Humboldt, le long de l'Amérique du Sud. Ces petites crevettes passent la journée dans les profondeurs et ne s'aventurent vers le haut qu'à la faveur de l'obscurité, pour manger des algues et chercher de l'air. Différents poissons et copépodes (des



Un flocon de neige marine est un agrégat de biomasse morte coulant vers le fond de la mer.

© Clara Hinrichs, Alfred Wegener Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung and Marum - Zentrum für marine Umwelt Wissenschaften

petits crustacés) survivent dans les zones mortes grâce à un métabolisme ralenti.

Les mammifères marins qui plongent en profondeur, comme les éléphants de mer, chassent préférentiellement dans les zones hypoxiques. C'est aussi le cas du vampire des abysses *Vampyroteuthis infernalis* (un poulpe), qui descend de 600 à 900 mètres de profondeur. Il y survit grâce à la grande surface de ses branchies et à l'hémocyanine, une hémoglobine bleue qui se lie efficacement à l'oxygène à des concentrations faibles. À long terme, tous ces animaux ont néanmoins besoin d'oxygène pour survivre.

LES AVATARS DE L'AZOTE

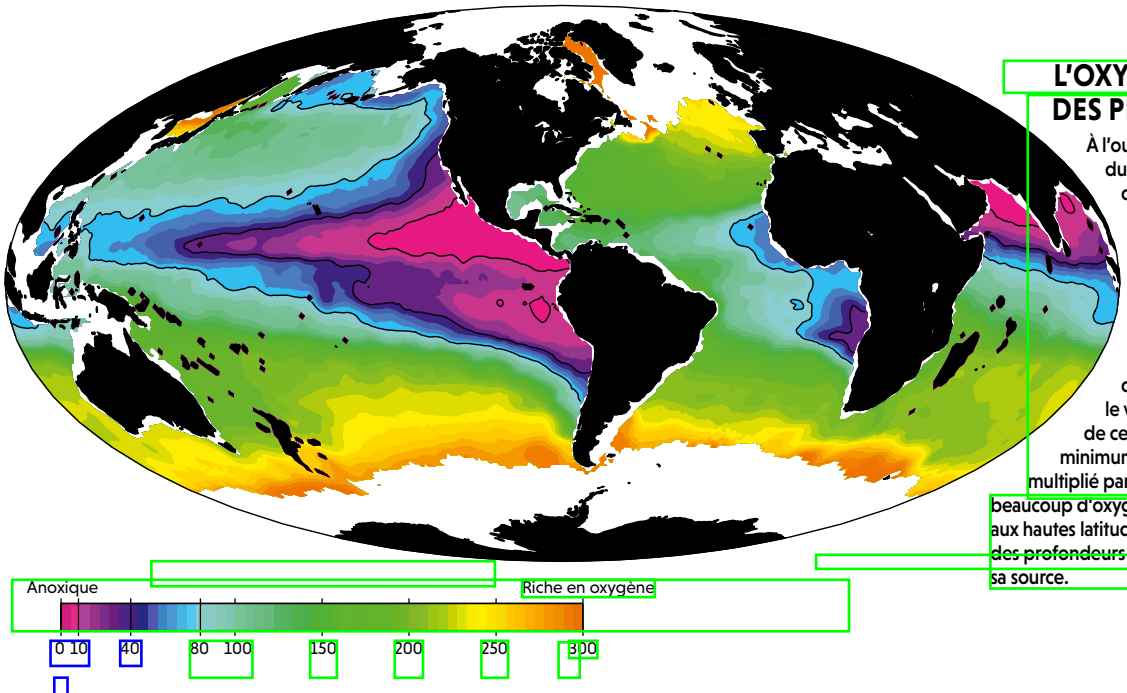
Pour de nombreux microorganismes, cette règle ne s'applique pas : quand l'oxygène s'amenuise, ils passent simplement à la respiration anaérobie. Certains couvrent leurs besoins en énergie et en CO_2 en oxydant des composés organiques, comme du sucre ou des acides aminés. Ce faisant, ils réduisent le nitrate (NO_3^-) en nitrite (NO_2^-), puis en protoxyde d'azote (N_2O) et enfin en azote moléculaire (N_2). D'autres utilisent des ions fer, manganèse ou sulfates (SO_4^{2-}) à la place de l'oxygène. Certains habitants unicellulaires des zones hypoxiques sont en mesure de fixer le CO_2 perdu dans l'eau, comme les algues avec la photosynthèse. Au lieu d'utiliser les rayons du soleil, ils utilisent de l'énergie de liaison chimique, stockée dans les composés anorganiques réduits, comme l'ammonium (NH_4^+) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Leur oxydation libère de l'énergie qui permet aux organismes de synthétiser du sucre et d'autres molécules nécessaires à leur croissance à partir du CO_2.

Les processus microbiens dans les OMZ jouent un rôle central dans le cycle de certains éléments indispensables à la vie, comme l'azote. Dans l'air, qu'il compose à 78 %, il se présente principalement sous la forme de molécule N_2 inutilisable pour la plupart des êtres vivants. Seuls quelques unicellulaires peuvent rompre la liaison et transformer l'azote de l'air en ammoniaque pour, par exemple, synthétiser des acides aminés.

Les animaux et les plantes absorbent l'azote biologiquement disponible. Lorsqu'ils meurent, les microorganismes recyclent leur biomasse et relâchent de nouveau l'azote, principalement sous forme d'ammonium et de nitrate. Deux groupes de bactéries, abondants dans les zones hypoxiques, retransforment les nitrates et l'ammonium en N_2. Il s'agit, pour les unes, des bactéries dénitrifiantes, qui oxydent le carbone organique à l'aide des nitrates, et pour les autres, des bactéries anammox (abréviation de « *anaerobic ammonium oxidation* », soit oxydation anaérobie de l'ammonium) découvertes à la fin des années 1990. Ces dernières utilisent l'ammonium et les nitrates pour récupérer de l'énergie nécessaire à la fixation du CO_2.

La grande disponibilité en nutriments et la pauvreté en oxygène créent des conditions optimales pour ces processus : 20 à 40 % de la

LE VAMPIRE DES ABYSSES SURVIT DANS LES ZONES PAUVRES EN OXYGÈNE GRÂCE À L'HÉMOCYANINE, UNE HÉMOGLOBINE BLEUE



© Johannes Karstensen et Rita Erven, Geomar Helmholtz-Zentrum für ozeanforschung Kiel

L'OXYGÈNE DES PROFONDEURS

À l'ouest de l'Atlantique et du Pacifique, au niveau des tropiques, comme dans le nord de l'Océan indien, à 400 mètres de profondeur, s'étendent d'immenses zones pauvres en oxygène *(en rose)*. Au cours des cinquante dernières années, le volume mondial de ces zones dites de minimum d'oxygène a été multiplié par quatre. On trouve beaucoup d'oxygène *(en orange)* aux hautes latitudes. C'est là que l'eau des profondeurs océaniques prend sa source.

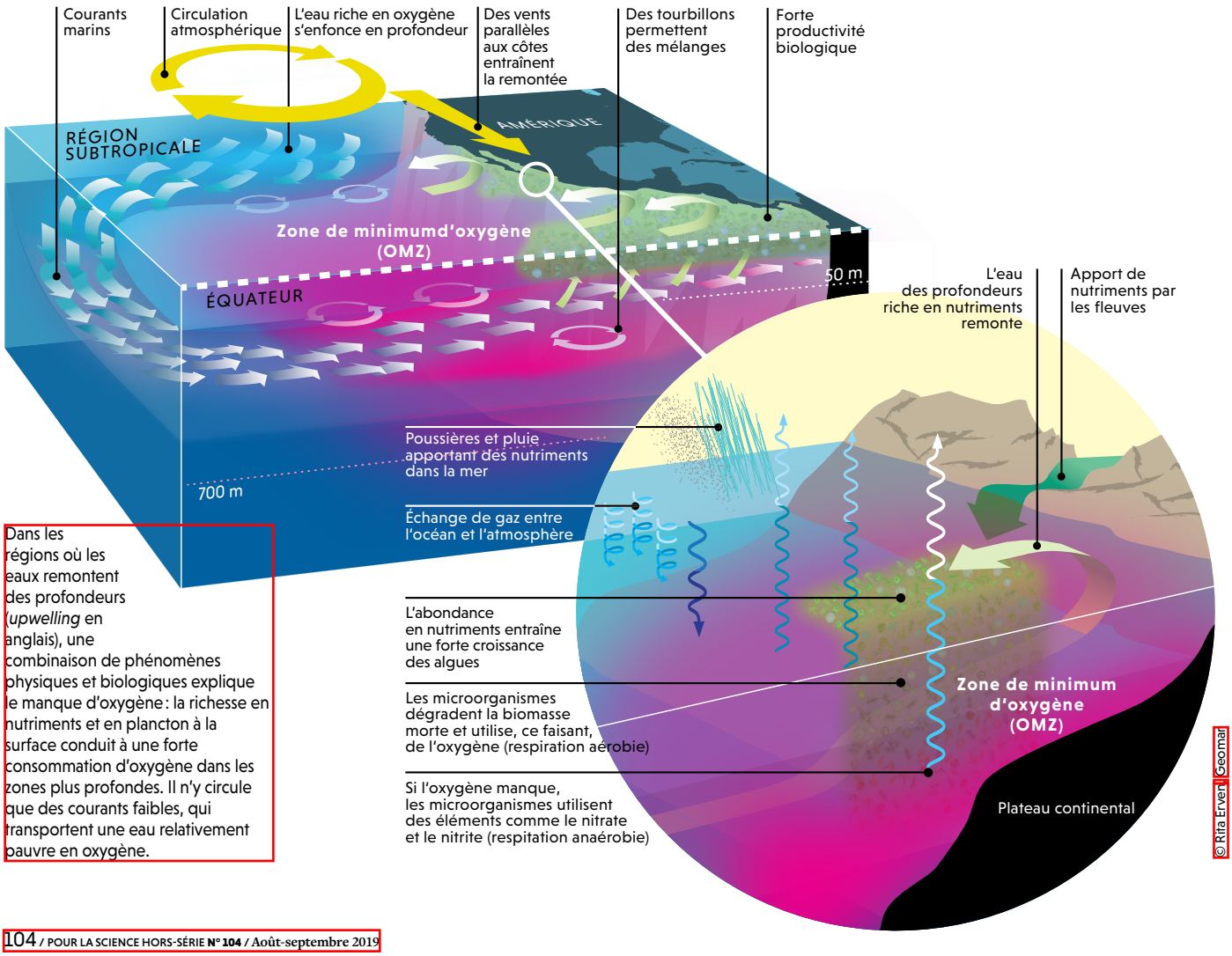
consommation en azote disponible dans l'océan se produiraient dans les zones anoxiques, bien qu'elles représentent moins de 1 % du volume total. Les zones mortes régulent ainsi sur le long terme la productivité maritime. En effet, l'eau retourne à un moment ou un autre en surface et, souvent, la quantité d'azote biologiquement disponible qu'elle contient contraint la croissance des algues.

LA NEIGE CARBONIQUE

Les eaux remontantes sont aussi importantes dans le cycle global du carbone, car en surface, de grandes quantités de CO_2 sont fixées par la photosynthèse puis envoyées dans les profondeurs sous forme de neige marine. En moyenne, à peine 1 % du CO_2 atteint le fond marin. Le reste est de nouveau relâché sous forme de CO_2 libre par des microorganismes tandis qu'il traverse des centaines voire des milliers de mètres de la colonne d'eau. En l'absence d'oxygène, le processus est plus lent, si bien que dans les zones hypoxiques ou anoxiques, davantage de dioxyde de carbone organique fixé atteint le fond et sort du cycle que dans d'autres zones marines.

Les émissions de gaz à effet de serre, de CO_2 en particulier, mais aussi de méthane et de protoxyde d'azote, augmentent la température de l'atmosphère et donc de celle de l'océan. La diminution concomitante de la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer entraînera l'extension des OMZ dans les décennies à venir. De fait, leur volume mondial a déjà été multiplié par quatre depuis le milieu du XX^{e} siècle. La solubilité réduite n'explique pourtant que moins de la moitié de l'appauvrissement en oxygène. L'essentiel est lié à l'affaiblissement de la circulation océanique, une autre conséquence du réchauffement de l'océan : l'eau de surface devenant moins dense, elle plonge moins et la colonne d'eau devient plus stable. L'oxygénation des profondeurs de l'océan diminue.

NAISSANCE DES ZONES MORTES



Dans les régions où les eaux remontent des profondeurs (*upwelling* en anglais), une combinaison de phénomènes physiques et biologiques explique le manque d'oxygène : la richesse en nutriments et en plancton à la surface conduit à une forte consommation d'oxygène dans les zones plus profondes. Il n'y circule que des courants faibles, qui transportent une eau relativement pauvre en oxygène.

En outre, les humains modifient le contenu en nutriments des mers, en y ajoutant d'énormes quantités d'azote *via* les fleuves où sont déversés les engrais chimiques et le lisier. Près des côtes en particulier, les populations d'algues et donc la consommation d'oxygène explosent. En un temps très court, la surfertilisation peut faire d'un habitat riche en biodiversité une étendue d'eau hostile à toute vie.

À long terme, les OMZ contrebalancent en partie la surcharge en nutriments. En effet, des processus microbiens y relâchent de l'azote N_2 sans « valeur » à partir des nitrates et de l'ammonium des engrais. Cet effet tampon dépend toutefois d'autres facteurs, comme la solubilité et la température de l'eau. Sur le moment, la dégradation des nutriments n'est pas propice aux organismes à branchies. Mais sur la durée, elle permet toutefois aux écosystèmes de se régénérer, notamment en établissant un nouvel équilibre entre apport et perte d'azote.

DE L'EAU PAUVRE EN OXYGÈNE EST REMONTÉE DES PROFONDEURS. SURPRIS, LES POISSONS SONT MORTS.

LE POISON DU POISSON

En Allemagne, les côtes de la mer Baltique illustrent ce qui se passe au niveau mondial lorsque la teneur en oxygène diminue : les populations de poissons meurent en masse quand l'eau chauffe beaucoup en été. Cela s'est produit à l'automne 2017 où des milliers de cabillauds, de poissons plats et d'autres animaux marins morts ont été rejetés sur la plage d'Eckernförde. La cause principale était un vent du sud, fort et persistant, qui a poussé l'eau de surface riche en oxygène de la côte vers le large. De l'eau pauvre en oxygène est remontée des profondeurs, ce qui a visiblement surpris les poissons. Pour les cabillauds, le manque croissant d'oxygène est problématique pour une autre raison. Les œufs de cabillaud ont une densité qui correspond à celle de l'eau profonde de la Baltique : ils flottent un peu au-dessus du fond. Si cette zone n'est plus suffisamment alimentée par l'eau qui arrive de la mer du Nord, riche en oxygène et plus lourde que celle de la Baltique, les embryons meurent d'asphyxie.

Un autre danger est l'enrichissement des régions pauvres en oxygène en sulfure d'hydrogène toxique. Ce composé se forme dans les sédiments, où il est retransformé par des microorganismes, en présence d'oxygène, en sulfate non toxique. Lorsque l'oxygène manque, le composé toxique s'échappe dans l'eau et occasionne des morts en masse. La libération de sulfure d'hydrogène du fond marin s'est produite à maintes reprises près des côtes namibiennes.

L'événement de ce type le plus important jamais documenté a entraîné la mort d'un nombre incalculable de poissons dans les eaux côtières du Pérou en 2009. Avec l'expansion croissante des OMZ, de tels événements surviendront plus fréquemment.

Au large, les populations de poissons sont aussi touchées par la quantité toujours plus faible d'oxygène. Un exemple : le thon rouge de l'Atlantique, un sportif de l'extrême qui parcourt de longues distances et fait des pointes à 80 kilomètres par heure. De telles performances demandent beaucoup d'oxygène. C'est pourquoi les thons – dont les populations sont déjà fortement décimées par la surpêche – sont menacés par le réchauffement des océans et la solubilité décroissante de l'oxygène dans l'eau de mer.

UN CERCLE VICIEUX

L'élargissement des zones mortes bouleversera tout autant les microorganismes. Des chercheurs de l'institut Max-Planck de microbiologie marine, à Brême, et de l'université du Danemark du Sud ont plongé des détecteurs ultrasensibles en 2016 dans les eaux du golfe du Bengale, qui borde la côte orientale indienne. Résultat : l'endroit est presque totalement anoxique. Le *presque* est important, car les microorganismes, qui utilisent le nitrate et l'ammonium, sont souvent inhibés par des traces d'oxygène. Mais si ce composé devait totalement disparaître, par exemple si la température de l'eau monte, les bactéries dénitrifiantes et anammox pourraient devenir particulièrement actives et transformer davantage de nutriments en N_2. Une modification même faible de la teneur en oxygène dans la région aurait ainsi des conséquences importantes.

Lors de l'expansion des OMZ, des processus dits de rétroaction positive, c'est-à-dire qui se renforcent seuls, surviennent. Le phosphate (PO_4^{3-}), l'élément le plus abondant dans l'océan avec le nitrate, est l'un des composants de la neige marine. Quand l'oxygène est présent, il se concentre dans les sédiments où il se lie à des particules, organiques ou non. Lorsque l'oxygène se raréfie, le phosphate retourne dans la colonne d'eau proche du fond.

Un cercle vicieux se met alors en place : si l'oxygène manque, le phosphate devient disponible, remonte dans la couche d'eau supérieure, éclairée par le soleil, et favorise la croissance des algues. Les cyanobactéries, qui peuvent fixer l'azote de l'air, profitent particulièrement du phosphate. Ainsi, davantage de biomasse est produite, puis coule et est décomposée par les microorganismes qui consomment de l'oxygène. L'anoxie s'étend, et des surfaces >

toujours plus grandes libèrent du phosphate. De tels mécanismes de rétroaction sont difficiles à stopper. Ils ont lieu par exemple dans la Baltique où, malgré la réduction de l'apport en nutriments, les zones anoxiques s'étendent.

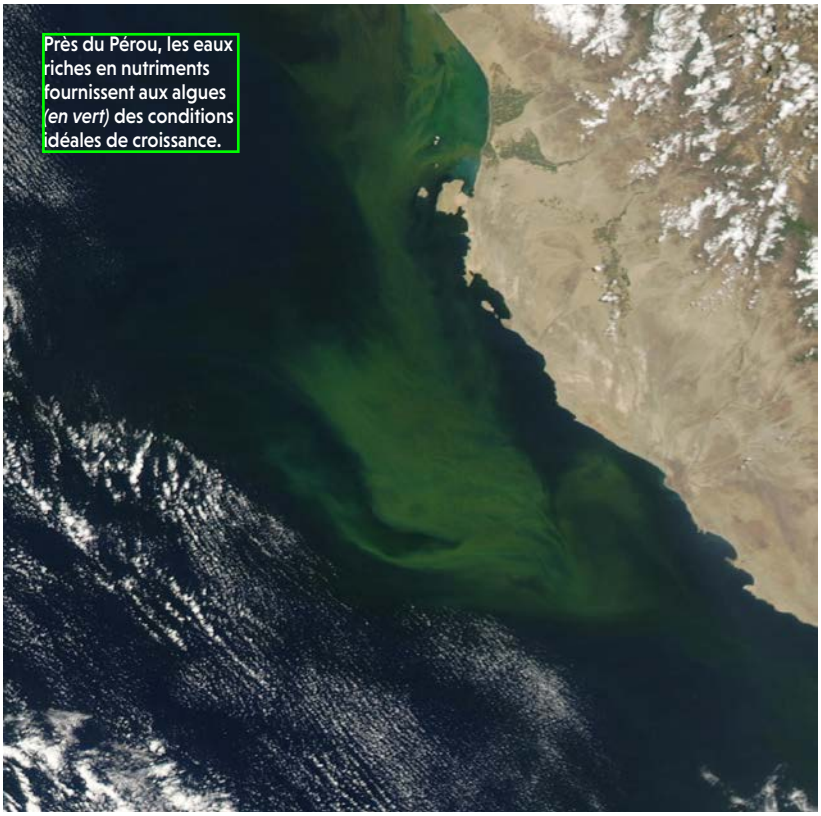
L'ANOXIE DU CRÉTACÉ

Que pouvons-nous apprendre sur l'avenir des océans de l'histoire de la Terre marquée par l'alternance de périodes chaudes et froides ? Les événements anoxiques des océans ont eu lieu principalement au cours des périodes de réchauffement global rapide et étaient liés à de fortes concentrations de CO_2 atmosphérique. On trouve la trace de tels événements au Crétacé (entre 145 et 66 millions d'années). Ils sont probablement dus à l'éruption de volcans qui auraient libéré de grandes quantités de gaz à effet de serre et réchauffé l'atmosphère. Les courants marins se sont modifiés. Les hautes températures ont aussi intensifié le cycle global de l'eau, un phénomène qui s'est accompagné d'une érosion accrue des roches et d'apports massifs de nutriments dans les océans, sous forme de phosphate. Au bout du compte, la quantité d'oxygène dans les mers a diminué considérablement. L'un de ces événements anoxiques, survenu il y a environ 91,5 millions, a engendré une importante extinction de masse.

Le Crétacé fut marqué par des processus qui font naître, encore aujourd'hui, des zones pauvres en oxygène : mélange insuffisant de l'eau des profondeurs combiné à une solubilité de l'oxygène réduite en raison de la hausse de la température de l'océan et des nutriments abondants. Une couche très fertile s'est formée près de la surface de la mer, recouvrant une immense zone anoxique. La matière organique s'y dégradant plus lentement, une quantité supérieure à celle d'aujourd'hui atteignait le fond. Pendant des millions d'années, ce dépôt s'est transformé en combustible fossile, que nous réintroduisons désormais dans le cycle du carbone.

En quoi contribuons-nous à l'expansion de régions marines pauvres en oxygène ? Et pouvons-nous empêcher que de nouvelles zones mortes se forment ? Nous avons deux leviers d'influence : le réchauffement global et l'apport massif de nutriments.

Le changement climatique est un problème complexe qui ne peut être résolu qu'au niveau international. La disponibilité en nutriments dans la mer est à l'inverse un souci d'ordre régional. L'importante production de biomasse près de la côte péruvienne résulte certes d'un processus naturel, la remontée d'eau profonde riche en nutriments, mais dans la Baltique ou le golfe du Bengale, les nutriments proviennent, pour une part non négligeable, des eaux domestiques, de l'industrie et de l'agriculture. On peut donc agir en réduisant l'épandage d'engrais et en construisant des stations d'épuration.



Près du Pérou, les eaux riches en nutriments fournissent aux algues *(en vert)* des conditions idéales de croissance.

© Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC

Au large, les produits de dégradation de l'azote, comme les oxydes, constituent une source de nutriments supplémentaire et en progression. Produits dans les régions industrielles et aux transports nombreux, ils se répartissent tout autour du globe et rejoignent la mer à la faveur des pluies. L'apport d'azote atmosphérique dans l'océan correspondrait à la quantité déversée par les fleuves près des côtes au niveau mondial.

TOMBE LA NEIGE…

Depuis une décennie, les chercheurs comprennent de mieux en mieux l'écologie et la dynamique des zones pauvres en oxygène. Toutefois, des questions sur leur apparition, le transport et la dégradation du matériel organique en conditions anoxiques restent en suspens. Sans ces informations, les simulations informatiques ne peuvent que difficilement faire des prévisions. Ainsi, la perte d'oxygène moyenne réelle de la mer est environ deux fois supérieure à celle annoncée par des modélisations.

Cet écart résulte-t-il d'une mauvaise estimation de la circulation océanique et de ses modifications ? D'une compréhension incomplète des processus biologiques et chimiques ? On l'ignore. Des expéditions sur le long terme sont encore nécessaires, ainsi que des observations de la neige qui tombe sur le fond des océans. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. BREITBURG *ET AL.*, Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters, *Science*, vol. 359, eaam7240, 2018.

L. BRISTOW *ET AL.*, N_2 Production Rates Limited by Nitrite Availability in the Bay of Bengal Oxygen Minimum Zone, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 24-29, 2017.

R. DUCE *ET AL.*, Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean, *Science*, vol. 320, pp. 893-897, 2008.

S. SCHMIDTKO *ET AL.*, Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades, *Nature* vol. 542, pp. 335-339, 2017.

L. STRAMMA *ET AL.*, Expansion of Oxygen Minimum Zones May Reduce Available Habitat for Tropical Pelagic Fishes, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 33-37, 2012.

BRETAGNE
1ER SITE TOURISTIQUE DE BRETAGNE
VOYAGE UNIQUE AU CŒUR DES OCÉANS
NOUVEAU
CET ÉTÉ VENEZ VIVRE
XPERIENSEA
Parcours immersif et technologique au cœur des abysses
Du 13 juillet au 25 août,
Océanopolis vous propose des expériences immersives et interactives pour découvrir la mer autrement.
Vous pensiez avoir tout vu ?
Ne manquez pas XperienSea.
Suivez notre actualité sur
oceanopolis.com
Copyright : Océanopolis - Getty Images - Stock - 018533
brest'aim
Océanopolis Brest

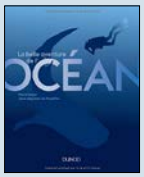
À LIRE EN PLUS

Demain l'océan : des milliers d'initiatives pour sauver la mer… et l'humanité
HUGO VERLOMME
ALBIN MICHEL, 2018
(400 PAGES, 22,50 EUROS)

L'océan est notre futur, le protéger, c'est sauver l'humanité. Armés d'une planche de surf ou d'un smartphone, à bord de voiliers low-tech ou de navires à hydrogène futuristes, ils sont des millions, connus ou inconnus, à sauver requins et baleines, dauphins ou hippocampes, à cultiver le corail ou les algues, à dialoguer avec les cachalots ou à créer des sanctuaires. Autant de lanceurs d'espoir qui inventent des techniques et des métiers pour dépolluer l'océan, le guérir, ou capter son inépuisable énergie.

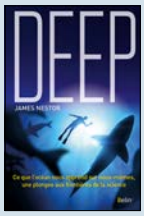
Tara : 500 jours de dérive arctique
MICHÈLE AULAGNON-PONSONNET ET FRANCIS LATREILLE
GALLIMARD, 2008
(188 PAGES, 29 EUROS)

En septembre 2006, la goélette *Tara* se laisse emprisonner par la banquise, au nord de la Sibérie pour un étrange voyage : la traversée de l'océan glacial Arctique, au gré de la dérive des glaces. L'expédition va durer plus de 500 jours. Confronté à la puissance des éléments, au jour permanent puis à la nuit polaire, l'équipage devra survivre dans des conditions extrêmes et remplir coûte que coûte sa mission : étudier les effets du changement climatique. Car le navire est une plate-forme de recherche pour le programme scientifique européen Damoclès.



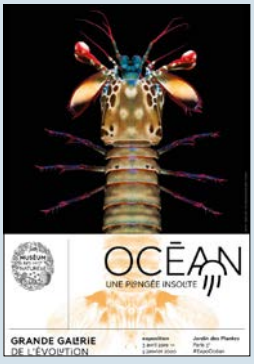
La belle aventure de l'océan
PIERRE ROYER ET JEAN-BAPTISTE DE PANAFIEU
DUNOD, 2018
(216 PAGES, 29 EUROS)

L'océan mondial, qui abrite la majorité des espèces vivantes sur Terre, génère aussi une grande part de l'oxygène que nous respirons. Il régule le climat de la planète et joue un rôle majeur dans la température terrestre. C'est aussi par la mer que circulent les hommes et les marchandises, permettant aux économies de se développer. De l'apparition de l'eau liquide, il y a plus de 4 milliards d'années, aux bateaux autonomes et aux robots plongeurs, cet ouvrage retrace en 100 dates l'histoire mouvementée de l'océan et de son exploration.



Deep
JAMES NESTOR
BELIN, 2018
(336 PAGES, 23 EUROS)

Durant deux ans, l'auteur, qui a passé sa vie sur l'océan, mais ignorait tout de ce qui se trouve sous la surface, a parcouru le globe en quête des secrets des apnéistes, pour comprendre ce qui nous connecte – physiologiquement, spirituellement – à l'océan et aux créatures qui l'habitent. Il a rencontré des personnages hors-norme, qui ont révolutionné les connaissances sur l'océan en marge des laboratoires et de la recherche académique. Un périple aux frontières de la science à couper le souffle qui transforme notre vision de l'océan.



EXPOSITION

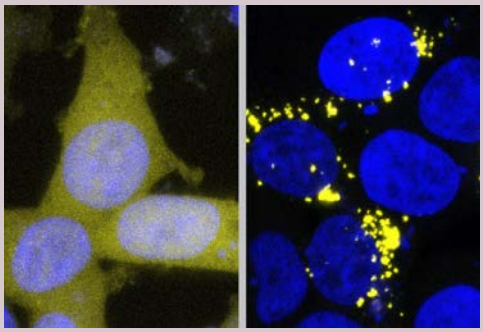
OCÉAN, UNE PLONGÉE INSOLITE
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, PARIS
JUSQU'AU 5 JANVIER 2020

La nouvelle grande exposition du Muséum, au Jardin des plantes, nous plonge dans les profondeurs de l'océan ! Ce territoire qui recouvre 71 % de la surface de la Terre abrite une immense biodiversité encore insoupçonnée. Au fil d'un parcours immersif, vous pourrez explorer des milieux insolites à la rencontre d'espèces aux caractéristiques étonnantes. Un voyage sous la surface qui invite à prendre conscience de la richesse du milieu marin et alerte sur les menaces que les activités humaines font peser sur lui.

RENDEZ-VOUS

P. 110

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

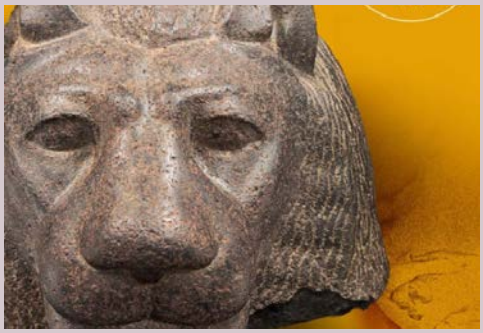


P. 114

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-SÉRIE N° 103 : NOMBRES

L'énigme de la capsule temporelle est résolue !

Bernard Fabrot, un programmeur indépendant belge, est venu à bout d'une énigme posée il y a vingt ans par l'un des créateurs du système RSA. La solution n'était attendue qu'en 2035…

Les nombres sont au cœur de nombreuses énigmes, dont plusieurs étaient proposées dans le *Hors-Série* n° 103 : « L'ordre caché des nombres ». L'une d'elles vient d'être résolue par le Belge Bernard Fabrot, programmeur indépendant.

En 1999, à l'occasion du 35e anniversaire du Laboratoire d'informatique du MIT, le cryptologue américain Ronald Rivest (l'un des trois inventeurs de l'algorithme de cryptographie à clé publique RSA) enferme dans une « capsule temporelle » conçue par l'architecte Frank Gehry plusieurs objets offerts par les pionniers du numérique comme Bill Gates, Bob Metcalfe, Tim Berners-Lee… et promet le contenu à celui qui résoudra le défi suivant, noté LCS35 :

Calculer $w = 2^{2^t} \pmod{n}$, pour $t = 79685186856218$ et n un entier donné de 616 chiffres décimaux, produit de deux grands nombres premiers (qui ne sont pas connus). Trouver la valeur de w sans connaître la factorisation de n oblige à effectuer quelque 80 000 milliards d'opérations itérées de mise au carré modul n en commençant par 2. À la fin, on peut traduire le résultat obtenu, w, en une phrase qui est le Sésame de la capsule.

Le problème a été conçu de façon à empêcher tout calcul parallèle. C'est un exemple de « fonctions à retard vérifiable » (notées VDF pour *Verifiable Delay Functions*), aujourd'hui étudiées pour sécuriser les blockchains, sur lesquelles reposent, par exemple, le bitcoin ou Ethereum. C'est un des thèmes de recherche de Cryptophage, un groupe d'experts en cryptographie dirigé par Simon Peffers, d'Intel, qui planchait également sur le problème de Ronald Rivest. Ils ont été coiffés sur le fil par Bernard Fabrot.

Celui-ci a découvert par accident l'énigme en 2015. Il en est venu à bout à l'aide de GNUMP, une bibliothèque logicielle de calculs sur des nombres entiers, qui a accaparé une partie de son ordinateur personnel (plus précisément, un cœur du microprocesseur) 24 heures sur 24 et sept jours sur sept, vacances exceptées, pendant trois ans et demi. Il devance ainsi de quinze ans les prédictions de Ronald Rivest, fondées sur la loi de Moore.

Surprise, lorsqu'il envoie son résultat, le laboratoire de Ronald Rivest n'existe plus : il est intégré dans une entité plus grande (le CSAIL) dont la directrice n'a jamais entendu parler du problème. Tout s'est bien terminé, par une cérémonie le 15 mai 2019 lors de laquelle la capsule temporelle a été ouverte. ■

LE COMMUNIQUÉ DU CSAIL : HTTP://BIT.LY/CSAIL-LCS35

Le contenu de la capsule temporelle est dévoilé devant notamment celui qui en a eu l'idée, Ronald Rivest *(à droite)*, et celui qui a réussi à l'ouvrir, Bernard Fabrot *(à sa droite)*.

© Rachel Gordon/MIT CSAIL

Une mémoire fondée sur l'aléa

La mémoire de travail, l'une de celles décrites ~~dans le *Hors-Série* n° 102 :~~ « Les mutations de notre mémoire », permet notamment de garder à l'esprit le nécessaire à l'accomplissement d'une tâche. Comment fonctionne-t-elle ? Flora Bouchacourt et Timothy Buschman, de l'université de Princeton, aux États-Unis, proposent un nouveau modèle plus en accord avec les observations que les précédents, mettant en jeu des connexions aléatoires récurrentes selon deux « couches » neuronales, l'une étant liée aux perceptions sensorielles afin de maintenir l'afflux d'informations.

F. BOUCHACOURT ET T. BUSCHMAN, *NEURON*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2019

La nature, bonne pour… la nature

Les bains de nature sont bons pour la santé, ~~les articles du *Hors-Série* n° 101 :~~ « La révolution végétale » en attestaient. Ils sont aussi bons pour la planète ! C'est le sens des résultats obtenus par Victor Cazalis (CEFE) et Anne-Caroline Prévot (CESCO). À partir de trois indicateurs (le score des candidats écologistes à diverses élections, le soutien aux associations environnementales et la participation à un programme de sciences participatives), ils ont montré que les Français ont des comportements d'autant plus écologiques qu'ils habitent dans un parc naturel (national ou régional), ou même simplement à proximité. On ne peut donc qu'encourager ces aires protégées, qui préservent le lien entre humains et nature, à poursuivre leurs actions. Et souhaiter voir le monde entier devenir parc naturel !

V. CAZALIS ET A.-C. PRÉVOT, *BIOLOGICAL CONSERVATION*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2019

HORS-SÉRIE N° 100 : MUSIQUE

Pastèque et musique nigériane

L'été est là, ses pics de chaleur et ses envies de rafraîchissement. Quoi de mieux qu'une pastèque ? Oui, certes, mais comment la choisir ? En habituant votre oreille aux sons des tambours nigérians. C'est l'étonnante découverte du chercheur et chanteur nigérian Stephen Onwubiko qui a été présentée lors du 177e congrès de la Société américaine d'acoustique, à Louisville, dans le Kentucky, aux États-Unis, du 13 au 17 mai 2019. Une nouvelle vertu de la musique à ajouter à celles décrites dans le *Hors-Série* n° 100 : « Good vibrations » !

Lorsque vous hésitez face à un choix de pastèques, vous tapotez les fruits en espérant repérer le plus mûr. Stephen Onwubiko a étudié la perception de ces sons chez des vendeurs et des consommateurs. Puis, avec la physicienne Tracianne Nielsen, de l'université Brigham Young, dans l'Utah, et la musicologue Andrea Calilhanna, de l'université de Sydney, en Australie, ils ont ensuite analysé ces sons et les ont comparés à ceux des igba, des tambours traditionnels du pays. Les points communs sont nombreux et, en particulier, les sons produits par des pastèques mûres ou non se retrouvent dans le répertoire musical.

Selon les chercheurs, les ingrédients de la musique traditionnelle nigériane (la hauteur, les rythmes, les décalages, les syncopes…) constitueraient au final l'entraînement parfait pour identifier les pastèques prêtes à être consommées. Une astuce à utiliser rapidement : les sons produits par une pastèque sont de plus en plus clairs à mesure qu'elle gagne en maturité. L'été s'annonce bien, avec des concerts sur les étals des marchés ! ■

S. ONWUBIKO *ET AL.*, *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, VOL. 145, ART. 1708, 2019

© Quik Shot/shutterstock.com

HORS-SÉRIE N° 101 : VÉGÉTAL

Le World Wood Wide Web

Champignons et bactéries relient les arbres et tissent un Wood Wide Web. La cartographie mondiale de ces symbioses révèle leur rôle clé dans la régulation du climat.

Les arbres des forêts tropicales et les microorganismes associés sont moins bénéfiques pour le climat que leurs homologues des régions tempérées et froides.

Sans les champignons, les forêts n'existeraient pas, le *Hors-Série* n° 101 : « La révolution végétale » le prouvait. De fait, les arbres profitent des bienfaits que leur procurent les champignons et les bactéries avec lesquels ils sont en étroite association. Par exemple, avec les très nombreuses ramifications de leurs filaments (les hyphes), les champignons explorent un volume de sol beaucoup plus important que les seules racines de l'arbre et transfèrent à ce dernier eau et sels minéraux. Ces hyphes permettraient également aux arbres de communiquer et certains n'hésitent pas à parler de Wood Wide Web. Une équipe internationale, emmenée par Brian Steidinger, de l'université Stanford, aux États-Unis, a entrepris d'étudier à l'échelle mondiale les relations symbiotiques entre les arbres et leurs microorganismes, champignons mycorhiziens et bactéries fixatrices d'azote.

À partir des données de la *Global Forest Initiative*, 31 millions d'arbres de 28 000 espèces, répartis dans 70 pays de tous les continents (sauf Antarctique) ont été pris en compte. On apprend que le type de mycorhize dépend du climat. Les ectomycorhizes (les hyphes entourent simplement les racines de l'arbre) sont notablement plus abondantes dans les régions tempérées et froides que les endomycorhizes (les hyphes pénètrent à l'intérieur des racines de l'arbre). Or avec les premières (60 % des arbres mondiaux pour seulement 2 % des espèces !), la séquestration du carbone dans le sol est plus importante, grâce à des composés secondaires inhibant la dégradation de la matière organique.

Avec le réchauffement du climat, les auteurs de l'étude prévoient une baisse de 10 % des champignons ectomycorhiziens et des arbres qui leur sont associés. La conséquence ? Une nouvelle augmentation du carbone atmosphérique… Les projets de reboisement, notamment celui du Programme des Nations unies pour l'environnement, doivent en tenir compte. ■

B. S. STEIDINGER *ET AL.*, *NATURE*, VOL. 569, PP. 404-408, 2019

HORS-SÉRIE N° 102 : MÉMOIRE

Alzheimer : la maladie à deux prions

Les deux protéines caractéristiques de la maladie d'Alzheimer – les protéines bêta amyloïdes et les protéines tau anormales – agiraient bien comme des prions, le type d'agents infectieux en cause dans la maladie de la vache folle.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, 135 millions de personnes seront touchées par la maladie d'Alzheimer d'ici à 2050, rappelait le *Hors-Série* n° 102 : «Les mutations de notre mémoire». C'est dire que la course contre la montre pour comprendre et vaincre cette maladie est lancée ! Une avancée importante vient d'être accomplie par l'équipe de Stanley Prusiner, de l'université de Californie, à San Francisco, aux États-Unis : les protéines qui déclenchent cette maladie agissent comme des prions.

Les deux protéines en question sont les peptides bêta amyloïdes qui s'accumulent en plaques (dites amyloïdes) en dehors des neurones et les protéines tau anormales (elles sont hyperphosphorylées). Ces dernières déstabilisent les microtubules, les rails moléculaires le long desquels circulent divers messagers dans la cellule.

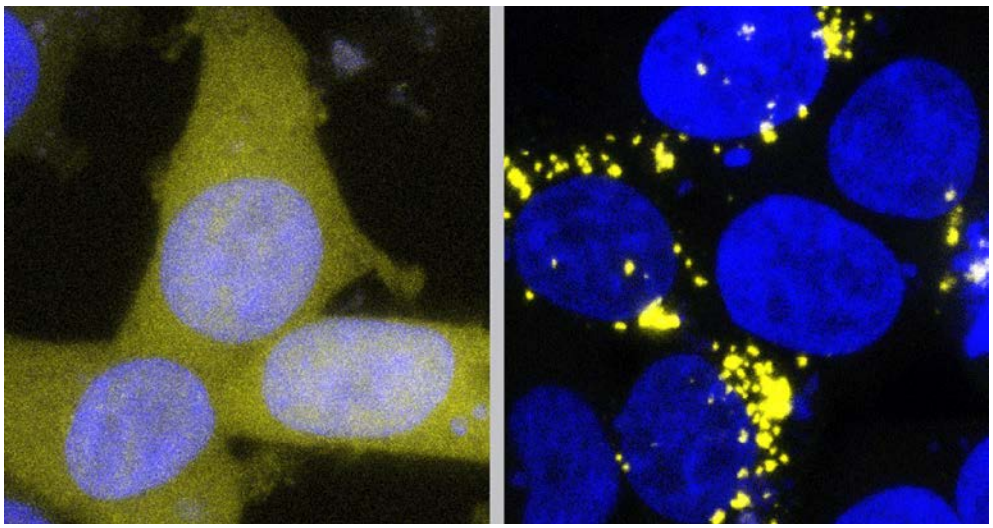
Les prions, dont la découverte en 1982 a valu à Stanley Prusiner le prix Nobel de médecine en 1992, sont des agents infectieux d'un genre nouveau : ce sont des protéines mal repliées qui transmettent leur anomalie à d'autres en cours de formation. Ce type de dysfonctionnement est impliqué notamment dans l'encéphalopathie spongiforme bovine, la maladie de Creutzfeldt-Jakob… Comment sont reliés les prions à la maladie d'Alzheimer ?

Dès 2012, Stanley Prusiner avait montré que la protéine bêta amyloïde se diffuse dans le cerveau, un premier indice plaidant pour un comportement de prion. Après d'autres travaux allant dans ce sens, les biologistes ont cette fois mis au point de nouveaux outils permettant de mesurer les quantités de protéines circulantes : ils les ont utilisés pour révéler l'activité de type prion des protéines bêta amyloïdes et tau anormales dans le tissu cérébral de 75 patients atteints d'Alzheimer d'âges divers (après leur mort) qu'ils ont comparée avec celle d'individus souffrant d'autres formes de démence (quelque 25 cas).

La maladie d'Alzheimer serait donc une pathologie à double prion. Selon les auteurs, de nouvelles voies menant à des tests de dépistage et des médicaments d'un type inédit sont désormais ouvertes… même si on ignore encore aujourd'hui comment éliminer les prions !

A. AOYAGI *ET AL.*, *SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE*, VOL. 11, ISSUE 490, EAAT8462, 2019

La protéine bêta amyloïde *(en jaune)* normale est présente de façon diffuse dans les neurones *(à gauche)*. Dans la maladie d'Alzheimer, elle s'agrège *(à droite)* en petits conglomérats.



Multiplication express

Pour multiplier deux nombres à 3 chiffres en suivant la méthode apprise à l'école, 3 × 3 = 9 multiplications élémentaires sont nécessaires, le *Hors-Série* n° 103 : «L'ordre caché des nombres» en parlait. Et avec des nombres à *n* chiffres, n^2 multiplications sont requises… c'est long, surtout quand *n* est très grand ! Joris van der Hoeven, de l'École polytechnique, et David Harvey, de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, en Australie, ont mis au point un algorithme beaucoup plus rapide. Le nombre de multiplications intermédiaires est désormais en *n* log *n*, et c'est probablement le meilleur résultat possible. En théorie, on peut donc multiplier deux nombres à 100 chiffres en seulement 200 opérations au lieu des 10 000. Problème, l'algorithme ne fonctionne pour l'instant que pour de très grands nombres. Les mathématiciens espèrent néanmoins identifier des variantes de l'algorithme pouvant s'appliquer à des nombres plus petits.

D. HARVEY ET J. VAN DER HOEVEN, 12 AVRIL 2019 : HTTPS://HAL.ARCHIVES-OUVERTES.FR/HAL-02070778

Dépression et musique triste

La musique est bonne pour la santé, le *Hors-Série* n° 100 : «Good vibrations» en apportait plusieurs preuves. Pourtant, on peut se demander pourquoi les personnes dépressives préfèrent-elles les musiques tristes, celles-ci ne semblant pas améliorer leur état ? Une étude de Jonathan Rottenberg, de l'université de Floride du Sud, et de ses collègues, apporte une réponse inattendue. Des travaux précédents avaient proposé que la motivation de ce comportement était d'augmenter l'état dépressif, ou au moins le maintenir. Selon les chercheurs, c'est en fait plutôt un effet calmant et relaxant qui est recherché.

S. YOON *ET AL.*, *EMOTION*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2019

© Prusiner lab - UCSF Institute for Neurodegenerative Diseases

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 hors-série papier (4 numéros par an)	✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr		✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)		✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)		✓
L'accès aux archives numériques 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 :
Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

PAG19STDDOS

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€ Au lieu de ~~114,40€~~ PTA79E

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier
- Accès illimité aux contenus en ligne

99€ Au lieu de ~~174,40€~~ ITA99E

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° ____

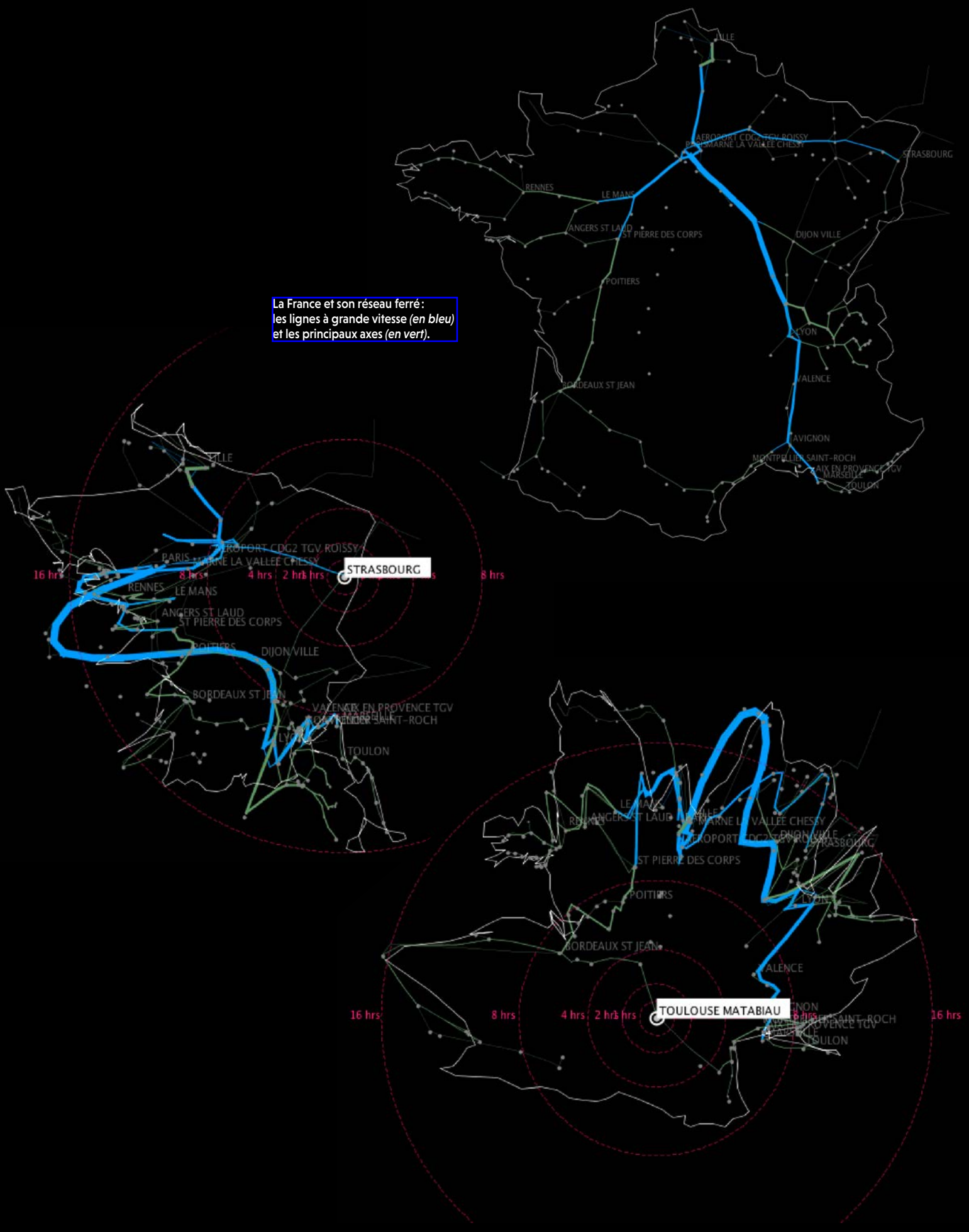
Date d'expiration ____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) ____

Signature obligatoire :

* 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 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

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

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



La France et son réseau ferré : les lignes à grande vitesse *(en bleu)* et les principaux axes *(en vert)*.

Prendre le train, prendre le temps

À la SNCF, des outils aident à visualiser le temps nécessaire pour parcourir la distance séparant deux villes à tout moment. D'autres mettent en évidence les retards en temps réel…

Le réseau ferré et toutes les infrastructures liées au transport ferroviaire sont truffés de capteurs qui collectent de grandes quantités d'informations. Pour les mettre à profit, la SNCF et son unité Innovation & Recherche se sont tournées vers le Senseable City Lab, de l'institut de technologie du Massachusetts. Il en résulte des outils qui révèlent sous un autre angle les voyages en train.

L'un des outils est la « France isochronique ». Au départ, la France est représentée telle qu'on se l'imagine (*ci-contre en haut*), avec son réseau de lignes à grande vitesse (*en bleu*) et les principaux axes (*en vert*). Il suffit ensuite de cliquer sur une ville (*Strasbourg, Toulouse ci-contre et Paris et ci-dessous*) pour voir le pays se transformer, se contracter ici, se dilater là, de façon à placer les villes sur des cercles (*en rouge*) correspondant chacun à un temps de voyage depuis la ville choisie. Les distances entre les villes ont été remplacées par des temps de parcours. L'interface permet de choisir n'importe quel moment de la semaine.

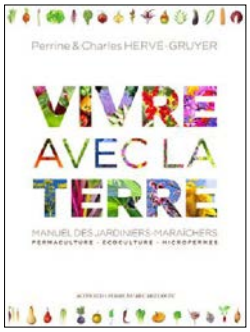
À partir de Paris, par exemple, on se rend compte qu'il est difficile de rejoindre rapidement les villes du nord de la France, excepté Lille (*à l'instant montré ici*). C'est aussi le cas pour Strasbourg. De Toulouse, toutes les villes indiquées sont à plus de quatre heures de trajet !

L'autre application (*non représentée*) met en évidence les retards, en temps réel, sur l'ensemble du réseau. On peut y voir que la réputation de la SNCF n'est pas méritée. Enfin, du moins, pas tout le temps ! ■

La vidéo de la France isochronique : https://youtu.be/bGyfuSIYWa0
Le site du Senseable City Lab : http://senseable.mit.edu/

© MIT Senseable City Lab/SNCF

À LIRE



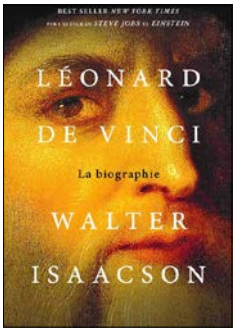
Vivre avec la Terre (coffret de 3 volumes)

PERRINE ET CHARLES HERVÉ-GRUYER

ACTES SUD, 2019

(1 050 PAGES, 79 EUROS)

Vous avez des jardinières sur votre balcon, quelques mètres carrés de potager, un grand jardin… voire envisagez une reconversion au vert ? Cet ouvrage est fait pour vous ! Il est le fruit de la Ferme du Bec Hellouin, dans l'Eure, où les auteurs, Perrine et Charles Hervé-Gruyer, expérimentent l'écoculture, une nouvelle forme d'agriculture qui se fonde sur l'imitation des écosystèmes naturels.
Le point de départ est l'observation et la compréhension du fonctionnement des milieux naturels, façonnés par des millions d'années d'évolution.
Vivre avec la terre, objet littéraire et scientifique, donne aux lecteurs les moyens de s'engager dans cette démarche. Jardiniers amateurs, professionnels de l'agriculture, chercheurs y trouveront les résultats de plusieurs années de recherche (la ferme a été créée en 2004) : la description détaillée de concepts clés, des données, des techniques alliant rendement et écologie qui ont fait leurs preuves…
Plus encore qu'un manuel, ce livre se veut un hommage à la beauté du monde, à son harmonie. « Le changement climatique s'accélère et devient chaque année plus évident, préviennent Perrine et Charles Hervé-Gruyer. L'humanité ne prend pourtant pas les mesures que l'urgence écologique devrait imposer. L'effondrement qui menace nous offre une opportunité unique de construire un monde meilleur. Choisissons la transition plutôt que de la subir, rendons-la désirable et joyeuse. »
À vos outils !



Léonard de Vinci. La biographie

WALTER ISAACSON

QUANTO, 2019

(590 PAGES, 27,50 EUROS)

Le 2 mai 2019 dernier marquait le 500e anniversaire de la mort de Léonard de Vinci. Faut-il encore présenter l'homme à qui l'on doit le tableau le plus célèbre du monde ? Walter Isaacson, ancien directeur de la rédaction du magazine *Time* et professeur à l'université de Tulane, à La Nouvelle-Orléans, pense que oui, et qui plus est en prenant le temps nécessaire (près de 600 pages) pour le prouver. Il s'est entouré des plus grands spécialistes, conservateurs et historiens et s'est plongé dans les 7 200 pages des carnets manuscrits de Léonard pour retracer la vie du « génie » et l'éclairer d'un jour nouveau. De ses débuts à Florence dans l'atelier de son maître Andrea del Verrocchio jusqu'au château du Clos Lucé, près d'Amboise, en passant par Milan, Rome, Venise… on découvre un Léonard de Vinci hors normes, autodidacte, esprit libre, à l'insatiable curiosité et surtout plein de joie et de fantaisie !
On apprend aussi qu'il se sentait inadapté, qu'il était distrait et prompt à la procrastination : ce serait une des raisons de sa « faible » production artistique. Il n'empêche, même avec « seulement » une quinzaine de toiles, il a révolutionné la peinture, avec son sfumato d'abord, qui consiste à rendre imprécis les contours, conformément à ce que l'œil voit : *La Joconde* en est l'emblème. Ensuite, il aurait été le premier à proposer qu'un portrait puisse exprimer les pensées de son sujet. En science, son apport est tout aussi immense. Un esprit exceptionnel sur la vie duquel on doit se pencher et prendre exemple. C'est ce que pensait Steve Jobs !

À VISITER

Une histoire d'abeilles

Le Muséum d'histoire naturelle du Havre accueille jusqu'au 10 novembre 2019 l'exposition *Abeilles, une histoire naturelle* conçue par le photographe Éric Tourneret. Un volet scientifique révèle les dernières découvertes sur l'organisation de la ruche, la communication, les mécanismes de prise de décision, les stratégies de lutte contre les prédateurs, le rôle de l'épigénétique dans le façonnage de la colonie, l'incidence de l'architecture sur la communication… L'autre versant de l'exposition est dédié aux images rapportées de nombreuses contrées réparties sur les cinq continents (Népal, Cameroun, Russie, Argentine, Mexique, Nouvelle-Zélande, Roumanie…) et qui illustrent la relation si singulière entre l'humain et l'abeille autour de la quête du miel. *Abeilles, une histoire naturelle* s'inscrit dans le programme Le Havre Nature, lancé en 2018 et qui se décline dans sept lieux emblématiques du patrimoine naturel de la ville.

http://bit.ly/Havre-Bee

À ÉCOUTER

Ça nique en botanique

L'émission CQFD, sur la Radio télévision Suisse (la RTS), fête les plantes et leur irrépressible envie de se reproduire à travers une série de cinq épisodes de 15 à 35 minutes chacun. Ils proposent de découvrir l'étonnante diversité des modes de reproduction des fleurs : les stratégies de pollinisation et les techniques de drague, le cas particulier des orchidées, le rôle incontournable des abeilles, les enjeux de la conservation à l'heure où la biodiversité est si menacée…

http://bit.ly/CaNique

À CLIQUER

L'Univers dans le creux de la main

Développée par le Cern et Google Arts & Culture, l'app Big Bang AR invite à un extraordinaire voyage interactif de 13,8 milliards d'années en réalité augmentée. On assiste à la formation des premiers atomes à partir des particules fondamentales, à la naissance des toutes premières étoiles, de notre Système solaire et de la Terre… Au passage, on crée une supernova, on explore une nébuleuse… Avec cette application, on tient dans le creux de la main l'espace, le temps et l'univers tout entier. Cerise sur le gâteau, on peut prendre un #StarSelfie et partager avec le monde entier le fait que notre corps est composé à 90 % d'éléments créés lors d'une supernova, les 10 % restants étant issus directement du Big Bang.

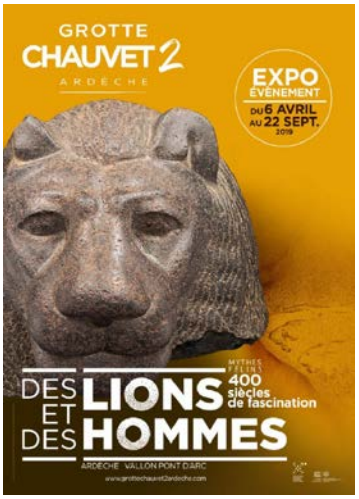
http://bit.ly/AppBB-AR

À VISITER

Envolez-vous

Le musée de l'Air et de l'Espace, au Bourget, en région parisienne, fête son centenaire. Pour l'occasion, il rouvre « Planète Pilote », son espace dédié aux enfants, qui peuvent, avec leurs parents, se glisser dans la peau d'un pilote, d'un astronaute, d'un steward… en pénétrant dans le cockpit d'un petit avion de tourisme, un Airbus A320, une station spatiale. Par divers dispositifs, numériques ou mécaniques, le public découvre aussi les principes de l'envol.
Le musée se prépare également à rouvrir d'ici la fin de l'année l'aérogare historique, une merveille Art déco construite en 1937 à l'occasion de l'Exposition internationale par l'architecte Georges Labro. Enfin, c'est l'occasion de redécouvrir la riche collection retraçant la conquête du ciel, de la naissance de l'aviation, au XVIIIe siècle, jusqu'aux avions de chasse les plus récents. Le fleuron reste deux concordes, dont le prototype 001. Embarquement immédiat !

https://www.museeairespace.fr/



À VISITER

Des lions et des hommes

Une exposition en Ardèche, dans la réplique de la grotte Chauvet, met à l'honneur les liens privilégiés qu'entretiennent humains et félins depuis des millénaires.

Lions, jaguars, tigres, panthères… Quel que soit le continent, les félins ont marqué par leur puissance et leur beauté les hommes et les civilisations qu'ils ont côtoyés. La première exposition internationale temporaire organisée par le site de la réplique de la grotte Chauvet, en Ardèche, rend hommage à cette fascination quasi universelle à travers près de 180 œuvres qui invitent à un tour du monde et à un voyage dans l'histoire.

Dans l'Europe préhistorique, le lion des cavernes effrayait nos ancêtres qui le représentaient sur les parois des grottes et sous forme de sculptures (soixante-quinze représentations de lions des cavernes ornent les parois de la grotte Chauvet originale). Il était également intégré au monde des croyances, l'hybride homme-lion en ivoire de mammouth découvert dans la grotte de Hohlenstein-Stadel, en Allemagne, en 1936, en atteste. Au Proche-Orient, et notamment en Mésopotamie, Ishtar, la déesse de la sexualité et de la guerre, était surnommée Inanna ou « la lionne ». En Égypte antique, le lion, parfois vénéré comme un animal sacré, était un symbole de pouvoir et de force. Dans les steppes d'Asie, les grands félins illustraient la brutalité du monde sauvage, l'agressivité et la vaillance recherchées par le chasseur et le guerrier. En Amérique, le jaguar, l'alter ego du lion, est l'un des sujets les plus fréquemment représentés dans l'art précolombien. Admiré pour sa force, sa vivacité et sa vitesse, il est divinisé sous la forme d'hybrides hommes-jaguars. En Afrique, le léopard est l'emblème des rois et prédomine dans la symbolique de nombreuses sociétés africaines, détrônant le lion.

À côté des objets rendant compte de ces relations étroites entre humanité et félins dans sept civilisations, les visiteurs pourront observer huit animaux naturalisés et la Uyan, la star de l'exposition. Il s'agit de la momie congelée d'un lionceau, datée de 46 500 ans, découverte dans les glaces de Sibérie, en république de Sakha (Yakoutie), en 2015, et présentée pour la première fois en France. L'animal, maintenu dans une vitrine spéciale à −24 degrés, est particulièrement bien conservé, avec tous ses poils, y compris ses moustaches, ses coussinets, sa musculature, ses organes internes… On sait que le lionceau n'a même pas eu le temps de téter sa mère quand un éboulement l'a emprisonné dans sa tanière.

La dernière salle de l'exposition est développée en collaboration avec la fondation Panthera, installée à New York. Elle présente l'état de conservation actuel des grands félins dans le monde afin d'alerter sur les menaces et risques d'extinction. Après 400 siècles de fascination, les grands félins ont-ils toujours une place à nos côtés ?

http://bit.ly/Chauvet-Lion

Le goéland, un serial killer !

© John Dickens/Getty Images

Il est le héros d'un roman célèbre des années 1970 qui prône la liberté et l'accomplissement de soi. Et c'est peut-être pour cette raison que le goéland ne prend guère de gants avec les autres espèces animales. En 2015, Austin Gallagher, de l'université Carleton, à Ottawa, avait montré que les goélands dominicains *Larus dominicanus* ont un faible pour les yeux des bébés phoques. Ces oiseaux s'en prennent aussi aux baleines !

Alejandro Fernández Ajó, de l'université d'Arizona du Nord, aux États-Unis, a étudié les fanons de cinq baleineaux échoués. À mesure qu'ils croissent, ces organes filtreurs accumulent, à la façon des cernes d'un tronc, les hormones du stress (le cortisol, la corticostérone…) et l'on peut y lire l'histoire de l'animal. Le profil des hormones (la concentration en fonction de la distance à l'origine du fanon, en l'occurrence la pointe) était corrélé au nombre et à la gravité des blessures infligées par des goélands dominicains. Sans agression, le profil est stable et bas. En revanche, avec des attaques répétées, le taux d'hormones croît rapidement après la naissance, traduisant un stress chronique.

Selon les auteurs, cette méthode pour reconstituer un aspect de la vie d'une baleine à partir des fanons serait utile lors d'autopsie, pour déterminer la cause de la mort. Et par conséquent, pour améliorer la protection des cétacés. ■

A. Fernández Ajó *et al.*,
Conserv Physiol., vol. 6(1), art. coy045, 2018.

Cette photographie est extraite du blog *Best of Bestioles* : http://bit.ly/PLS-BOB

En sphère et contre tout

Certains croient encore que la Terre est plate. Pourtant la question est réglée depuis plusieurs millénaires, grâce à l'intuition de philosophes et mathématiciens grecs. Une exposition en fait l'éclatante démonstration.

En 2020, une croisière organisée par la *Flat Earth Society* voguera vers l'Antarctique afin de montrer que la Terre est un disque plat, entouré d'un mur de glace et recouvert d'un dôme. Des fous isolés? Pas tout à fait. En France, selon une étude Ifop, 9% de la population croit «possible que la Terre soit plate». Tous ces platistes feraient mieux d'aller visiter l'exposition *Le Monde en sphères*, à la Bibliothèque nationale de France, à Paris.

Elle retrace 2500 ans d'une histoire des sciences et des représentations du ciel et de la Terre. Et l'on y découvre que le modèle sphérique, que ce soit pour le ciel (la sphère céleste) ou pour notre planète, s'est imposé très tôt. Cette conception est née de l'observation des mouvements cycliques du ciel (mouvements du Soleil, de la Lune, des étoiles, des planètes...), des éclipses et de l'ombre des gnomons sur les cadrans solaires. Elle doit aussi beaucoup à l'analyse des propriétés géométriques de la sphère: c'est le plus grand des corps tridimensionnels réguliers, pour un volume donné; le centre est équidistant de tous les points de la surface...

Et ainsi, dès le VI^e siècle avant notre ère, sous l'impulsion de Pythagore, de Platon, d'Aristote... le modèle sphérique s'imposa comme forme la plus logique pour un cosmos harmonieux dans lequel les étoiles et les planètes sont disposées sur des sphères dont le centre est occupé par la Terre, elle-même sphérique.

La sphère céleste en argent (*voir page ci-contre*) trouvée dans la région du lac Van, à l'est de la Turquie, est un magnifique témoignage. De 6,3 centimètres de diamètre et datée du II^e siècle avant notre ère, elle atteste des débuts de la fabrication de globes en Grèce, entamée par l'astronome grec Eudoxe de Cnide au IV^e siècle avant notre ère. L'objet est dépourvu de bande zodiacale, cette absence étant caractéristique des premiers globes fabriqués en Grèce. Parmi les 48 figures ciselées à la surface de la sphère, 46 représentent des constellations classiques, les deux autres correspondant à des groupes d'étoiles innommés.

Le modèle sphérique fut perfectionné et popularisé par Claude Ptolémée d'Alexandrie au II^e siècle. Son succès perdura jusqu'à la révolution copernicienne, au XVI^e siècle. La Terre cessa certes d'être le centre de l'Univers, mais pas d'être sphérique pour autant! ■

«Le Monde en sphères», jusqu'au 21 juillet 2019, Bibliothèque nationale de France, site François Mitterrand, à Paris. www.bnf.fr/fr/agenda/le-monde-en-spheres

© Avec aimable autorisation de Nicolas et Alexis Kugel

PROCHAIN HORS-SÉRIE

en kiosque le 9 octobre 2019

Qui sommes-nous ?

Notre identité serait tapie dans notre ADN, et beaucoup y croient encore, le succès des tests génétiques le prouve. Pourtant, l'ADN est loin d'être un sanctuaire. *Via* l'épigénétique, nos gènes sont sous l'emprise de l'environnement. Avec les nouveaux outils comme CRISPR-Cas9, il est désormais possible de modifier des gènes dans n'importe quel type de cellule avec une facilité et une précision redoutables. Et notre microbiote, constitutif de notre être, contient trente fois plus de gènes que nos cellules ! Que devient alors l'idée d'individu ?

© Peshkova/shutterstock.com

Achevé d'imprimer chez Roto Aisne (02) – N° d'imprimeur : 18/03/0020 – N° d'édition : M0770699-01 – Dépôt légal : juin 2019.
Commission paritaire n° 0922K82079 du 19-09-02 – Distribution : Presstalis – ISSN 1 246-7685 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Ensemble

- AIDONS LES ENFANTS MALADES.
- SOUTENONS LA RECHERCHE MÉDICALE.

CONTRE LE CANCER DES ENFANTS

JE M'ENGAGE, JE FAIS UN DON* !

Je donne en ligne sur luluetlpbl.com, rubrique "Soutenez-nous"

ou par chèque à l'ordre de Lulu et LPBL à nous adresser par courrier.

*DONS DÉDUCTIBLES DES IMPÔTS

Je verse 30€, mon don ne me coûtera que **10€ après réduction fiscale.**

DÉCOUVREZ NOS ACTIONS SUR NOTRE SITE

LULUETLPBL.COM

SUIVEZ-NOUS SUR

Ensemble contre le cancer, Pour la vie !

LULU & LES P'TITES BOUILLES DE LUNE

Association loi 1901
8, allée Edith Cavell
77310 SAINT-FARGEAU-PONTHIERRY
Courriel : contact@luluetlpbl.com

luluetlpbl.com

MNHN 2017 — Graphisme : 3 : 3um — Photo © Muséum national d'histoire naturelle / P. Chanu

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

OCÉAN

UNE PLONGÉE INSOLITE

GRANDE GALERIE
DE L'ÉVOLUTION

exposition
3 avril 2019 —
5 janvier 2020

Jardin des Plantes
Paris 5e
#ExpoOcéan

MACIF Essentiel pour moi
france•tv
3 paris Ile-de-France
3 bretagne
Le Point
RATP
Sciences Découvertes
UGC
OUI sncf
fnac
ouest france
France Inter