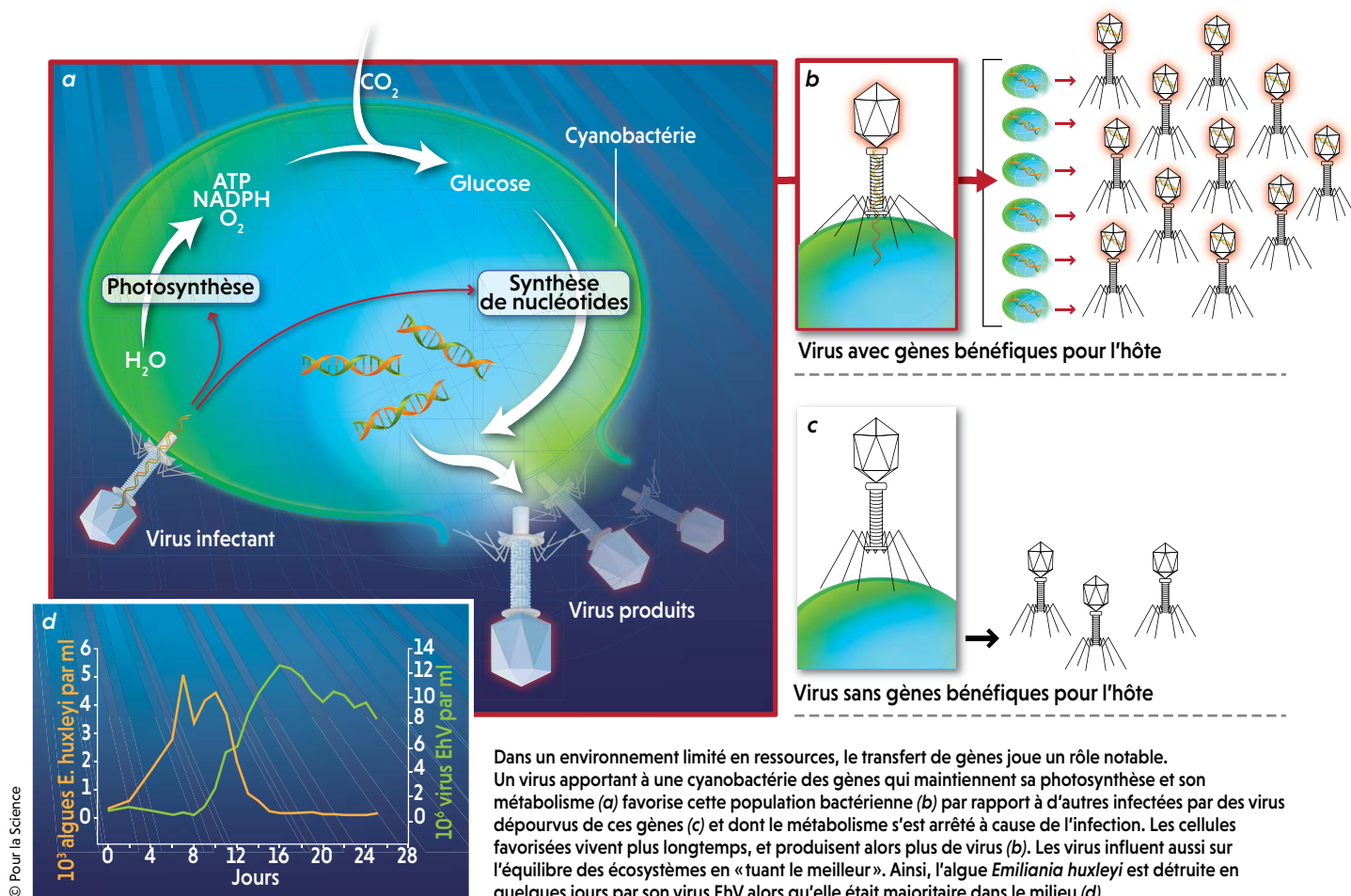




nombre de 10^{24} pour l'ensemble des océans, selon une évaluation prenant en compte les concentrations bactériennes et virales connues, la probabilité de rencontre de l'hôte et du virus ou encore les conditions environnementales.

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 ABYSES 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

BIBLIOGRAPHIE

- A. GREGORY ET AL., Marine DNA viral macro- and micro-diversity 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.

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? ■

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.

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*...

A

u 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

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.

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



- > 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



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>

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 débris flottants.

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 faisons jusqu'à cinq prélèvements par jour : nous passons 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 ribosomiaux 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 pourrions 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 microdébris. 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.

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 environne-

ments divers et à des concentrations de nutriments très différentes grâce à leur capacité à fixer l'azote.

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 ➤

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

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

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

compréhension des impacts du plastique sur l'écosystème méditerranéen. 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

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

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.

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



À 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.



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