

**Philippe Potin**

BIOLOGISTE MARIN, ROSCOFF
 Directeur de recherche CNRS, ce spécialiste
 mondialement reconnu des algues travaille à la
 Station biologique de Roscoff, dans le Finistère.

Les forêts d'algues, une richesse insoupçonnée

La prolifération d'algues vertes sur les côtes bretonnes ou de sargasses (algues brunes) aux Caraïbes donne à ces végétaux sous-marins une mauvaise réputation – même si les algues sont consommées depuis longtemps à travers le monde. Pour l'auteur, il est temps de les réhabiliter. Les forêts de grandes algues marines sont appelées à devenir un acteur majeur de la transition écologique, en nous aidant à relever un double défi : assurer la sécurité alimentaire de plus de 9 milliards d'humains en 2050, tout en limitant nos émissions responsables du réchauffement climatique.

NICOLAS FLOCH © ADAGP, PARIS 2022 - DR

◀ Forêt de sargasses (*Sargassum muticum*) et des laminaires (*Laminaria sp.*, rubans au fond), au large de l'île d'Hoedic, au sud du Morbihan. Cette photo de l'artiste photographe Nicolas Floc'h s'inscrit dans une série appelée *Initium maris*, qui se veut une « expédition artistique » représentant les paysages sous-marins au large des côtes et îles bretonnes dans le contexte du réchauffement climatique.

«

Le nombre de créatures vivantes de tout ordre dont l'existence dépend intimement des forêts d'algues est merveilleux. Je ne peux que comparer ces grandes forêts aquatiques avec celles terrestres des régions intertropicales. Pourtant, si dans un pays une forêt était

détruite, je ne crois pas qu'autant d'espèces animales périraient qu'ici, à cause de la destruction des algues. » Cette citation du célèbre naturaliste anglais Charles Darwin figure dans la publication de 1839 du *Voyage du Beagle* lorsqu'il raconte son passage en Terre de Feu. Elle insiste sur l'impressionnante biodiversité des forêts d'algues brunes marines, connue depuis longtemps et, surtout, sur les fonctions multiples qu'elles fournissent, comparables ou supérieures à celles des forêts terrestres.

Les paysages sous-marins inspirent les naturalistes, mais attirent également les artistes, car ils constituent des systèmes écologiques originaux. Les images que le photographe Nicolas Floc'h réalise dans les fonds marins s'inscrivent à l'opposé de l'iconographie classique comportant une dominante verte ou bleue, des poissons et coraux aux couleurs accentuées par le flash. Tout en contraste, l'artiste apnéiste souhaite que ses clichés de récifs ou de paysages, le plus souvent en noir et blanc, mettent en avant l'environnement et les structures des habitats, tout en restant assez indéfinis. En effet, lorsqu'on contemple ses images, on se demande si le paysage est sous-marin ou extraterrestre... Ses photographies, notamment celles réalisées en Bretagne au cours de multiples plongées dans les forêts de laminaires – un genre d'algue brune – ou les champs d'himanthales – algue comestible vert olive ou brune – révèlent toute la beauté et la richesse de ces habitats.

Ces systèmes écologiques sont parmi les plus productifs en biomasse de la planète. Les grandes algues brunes sont des espèces dites « fondatrices » ou « clés de voûte » à la base du fonctionnement des communautés marines. Elles sont associées à de véritables oasis sous-marines et à de vastes champs d'algues dans l'estran, la zone de balancement des

marées – cet espace que vous avez la chance de découvrir dans les régions où la mer se retire parfois sur des kilomètres, comme en Bretagne. Leur canopée protège de la lumière et/ou de la déshydratation à marée basse, et elles sont le support d'autres algues rouges, vertes et brunes. Elles abritent également de nombreux animaux invertébrés fixés au substrat, ainsi qu'une communauté microbienne aussi essentielle que notre microbiote intestinal et cutané l'est pour nous. Leur activité photosynthétique considérable contribue à l'absorption du gaz carbonique et à une production d'oxygène dans la journée. On estime aujourd'hui que les forêts d'algues sauvages le long de l'ensemble des côtes rocheuses de la planète occupent une surface équivalente à celle de la forêt amazonienne. Leur productivité serait deux fois supérieure pour une même unité de surface ! Elles sont aussi source d'autres émissions gazeuses iodées et soufrées qui influent sur le climat local et sur la chimie atmosphérique.

Quant à la matière organique qu'elles pro-

Une productivité en biomasse deux fois supérieure à celle de l'Amazonie

duisent, comme des protéines et des glucides complexes (dont l'acide alginique et la laminarine, que nous utilisons en médecine, en agriculture...), plus des trois quarts est exportée vers des zones sableuses ou dans les laisses de mer (*) où celle-ci enrichit les chaînes alimentaires. Au cours de sa vie, qui peut s'étendre, selon les groupes, de quelques semaines ou mois à quelques années, voire jusqu'à plus d'un siècle pour l'*Ascophyllum nodosum* de l'Atlantique Nord, une algue brune secrète dans l'eau entre 14 et 35 % de toute la matière organique qu'elle produit. Une partie de cette biomasse, exportée sous forme de matière dissoute ou de débris et particules, se retrouve en profondeur et participe au stockage du carbone dans les océans.

Si les algues jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes marins, elles sont également un gisement de nourriture pour les humains, et cela sans doute depuis leurs débuts. Selon l'hypothèse dite de « l'autoroute du kelp » (**), les forêts d'algues brunes géantes le long des côtes du Pacifique Est auraient facilité la colonisation de l'Amérique, par les premiers humains, lors du dernier maximum glaciaire (il y a environ 21 000 ans). Ces forêts marines sont toujours présentes, et constituent encore une ressource directe et indirecte via les pêcheries associées de crustacés, mollusques et poissons. Grâce à des fouilles archéologiques sur le site de Monte Verde, au Chili, nous savons que la valorisation des algues en tant qu'aliment a des racines très anciennes, au moins 14 000 ans (1). En Asie, l'algue est restée un aliment quotidien et la domestication de plusieurs espèces a permis de développer une mariculture florissante. Dans les pays occidentaux, comme la France, ce n'est que récemment que leur intérêt alimentaire a été mis au goût du jour (lire l'encadré p. 95). Toutefois, la mariculture peine à s'y développer pour plusieurs raisons : une répulsion pour la consommation d'algues, la difficile maîtrise de cycles de production et une perception sociétale négative.

Tous ces services rendus par les algues, et qui restent encore insuffisamment quantifiés, justifient pleinement de chercher à les défendre. L'enjeu ? Préserver les forêts de grandes algues, au sein d'aires marines protégées, afin d'anticiper les impacts du changement global : limiter l'acidification des océans, enrayer les pertes de biodiversité et réduire l'eutrophisation (*) des milieux côtiers. Ces services se sont d'ailleurs déjà modifiés très récemment sous la pression des changements anthropiques, réchauffement climatique en tête. En 2017, les photographies de Nicolas Floc'h prises au Japon dans le grand courant chaud Kuroshio, au cours de la mission Tara-Corail, sont à ce titre exemplaires. Les remontées plus au nord des eaux chaudes à cause du changement climatique transportent des larves de coraux qui parviennent à établir des têtes de corail au milieu des laminaires des eaux japonaises. On assiste là à la rencontre de deux écosystèmes en équilibre très provisoire, car ils entrent en concurrence pour

11 000

ESPÈCES DE MACRO-ALGUES environ seraient recensées, dont 1500 peuplent les mers d'Europe. Le nombre total d'espèces d'algues, lui, varie selon les estimations de 30 000 à plusieurs millions !



▲ Échantillon de macro-algue brune conservé à la Collection de culture de la Station biologique de Roscoff. Celle-ci est au cœur de nombreuses recherches sur les algues marines et leur valorisation économique.

(*) Le kelp est un mot anglais qui désigne toutes les algues brunes de l'ordre des Laminariales et quelques grandes espèces de Fucales, comme *Durvillea antarctica* dans les eaux australes.

(**) L'eutrophisation est une perturbation ou un déséquilibre écologique dû à un excès de nutriments dans un écosystème.

l'occupation du fond marin. Il est probable que le réchauffement de ces eaux océaniques, auparavant tempérées, favorise sur le long terme l'implantation des jeunes coraux mieux adaptés à ces conditions de température.

Il y a urgence, les effets du changement global sont déjà visibles. Darwin serait sans doute moins enthousiaste s'il visitait aujourd'hui certains des estrans rocheux de nos côtes européennes, s'il plongeait dans les forêts autrefois florissantes des côtes californiennes, de certaines régions du Japon, de Tasmanie ou du sud de la Norvège. En trente ans, les forêts et champs d'algues brunes ont décliné à grande échelle, en répartition et en quantité. En réponse au changement climatique, leurs latitudes de distribution ont changé dans de nombreuses régions du monde. Dans une vaste étude internationale publiée en 2016, qui fournit l'analyse la plus complète des tendances des populations de grandes algues brunes menée à ce jour, les chercheurs ont montré que les biomasses ont diminué dans 38 % des écorégions examinées, et ont augmenté, ou sont restées stables dans respectivement 27 % et 35 % des écorégions, en réponse à différents facteurs en interaction entre les échelles régionales et locales (2). Le changement climatique anthropique et d'autres activités humaines entraînent donc la redistribution des espèces à l'échelle mondiale.

MAÎTRISER LES PROCÉDÉS DE CULTURE

Les forêts d'algues sont également sujettes à la déforestation à l'échelle locale. Les facteurs en cause : les fortes houles engendrées par les tempêtes, plus puissantes et plus fréquentes, des phénomènes récurrents comme les événements El Niño dans le Pacifique, des vagues de chaleur marines de plus en plus fréquentes et persistantes, l'affaiblissement des remontées d'eaux froides et nutritives, les rejets et/ou déversements d'eaux usées, et le surpâturage par les oursins herbivores. En effet, des travaux de modélisation ont estimé il y a près de quinze ans que les populations de l'algue géante *Macrocystis pyrifera* avaient 60 % de chance d'être complètement perdues dans de nombreux endroits le long de la côte

(*) Les laisses de mer représentent les débris laissés sur la plage à marée basse.



▲ Forêt sous-marine mêlant himanthales (*Himanthalia elongata*, en formes de longues cordes verticales) et laminaires (rubans larges, proches du fond), au large de l'île de Molène, dans le Finistère. En Bretagne, les laminaires sauvages sont exploitées depuis longtemps pour en extraire des composés d'intérêt pour l'industrie. Photo de Nicolas Floch pour sa série Initium maris.

(*) La méiose est un processus de division cellulaire particulier qui produit des cellules qui n'ont qu'un seul jeu de chromosomes, comme le gamète, à partir de cellules en ayant deux.

(*) Le recrutement est le processus d'ajout de nouveaux individus à la population d'une espèce par la naissance, l'immigration ou l'implantation de graines. En général, le recrutement est effectif lorsque les jeunes survivent et s'établissent pour contribuer à la population.

californienne au bout de vingt ans. Cela s'est malheureusement vérifié au cours de la dernière décennie (3). Étant donné que plusieurs de ces facteurs de stress environnementaux peuvent survenir simultanément, il est souvent difficile d'en identifier un seul responsable du déclin des forêts d'algues. Toutefois, il est clair que la température de l'eau joue un rôle clé et qu'elle affecte particulièrement les capacités reproductrices des algues brunes. Au-delà d'un certain seuil, qui est de quelques jours de température supérieure à 18-19 °C sur les côtes bretonnes, les mécanismes de la reproduction sexuée sont altérés, notamment la méiose (*). Le recrutement (*) des nouvelles générations d'algues brunes est particulièrement affecté. Évaluer comment ces forêts se remettent de ces pertes peut être encore plus difficile, mais cela sera nécessaire si l'on veut prédire comment les forêts de grandes algues brunes évolueront avec le changement climatique. Si l'on veut agir – accroître l'approvisionnement et préserver les écosystèmes –, la maîtrise des procédés de culture des algues est l'enjeu majeur ! L'essentiel de la valorisation des algues en Europe est encore trop dépendant de récoltes dans des gisements naturels – même si celles-ci sont gérées durablement – et d'importations depuis différentes régions du monde. Une grande partie de la biomasse récoltée est dominée par les algues brunes

laminaires et l'*Ascophyllum nodosum*. On en extrait surtout des alginates, qui trouvent des applications dans les industries agroalimentaire, pharmaceutique, textile, cosmétique et la production d'aliments pour les animaux d'élevage. En agriculture, on utilise les alginates pour produire des composés bioactifs, notamment en tant qu'alternatives aux intrants chimiques (engrais et pesticides). Le recours à cette biomasse d'origine marine réduit l'empreinte carbone de toutes ces industries, tout en permettant la croissance d'un secteur économique en France qui représente une valeur de plus de 500 millions d'euros de chiffre d'affaires pour les entreprises. Les notions de « volume d'algues potentiellement valorisables » et de « valeur » sont d'ailleurs primordiales, car le produit de l'algoculture mondiale, qui s'accroît de 5 à 10 % chaque année depuis vingt ans, combiné celui des pêcheries d'algues, représente une biomasse encore mille fois inférieure à celle des productions végétales terrestres. Elle présente aussi un rapport valeur monétaire sur volume prélevé très faible comparé aux productions animales aquacoles.

Ainsi, si l'on veut générer des profits notables de cette culture, il faudra augmenter considérablement la quantité d'algues produite, en premier lieu en développant des systèmes de production en mer ou sur terre. L'idéal serait de parvenir à cet accroissement en l'intégrant avec d'autres productions animales marines, tout en gardant une empreinte globale la plus neutre possible, voire positive, afin de rester en phase avec les attentes de la société.

LES DÉFIS DE LA RECHERCHE MARINE

Cet essor des cultures ne pourra s'opérer qu'en assurant la préservation des peuplements sauvages d'algues. Car ce sont bien les forêts sous-marines naturelles qui assurent, et assureront, l'essentiel des services écosystémiques rendus par les algues. À l'échelle mondiale, la détérioration et la destruction des habitats naturels menacent les fonctions écologiques, et entraînent des pertes de valeurs sociales et économiques. Reconnaisant cette menace, l'ONU a déclaré la période 2021-2030 « décennie de la restauration », avec l'objectif de restaurer

350 millions d'hectares d'écosystèmes dégradés. À grande échelle, l'objectif est d'intensifier les efforts afin de promouvoir la résilience aux changements climatiques et anthropiques, et inverser le déclin de la biodiversité. Il faut profiter de ce cadre pour entreprendre des initiatives de lutte contre la dégradation des forêts d'algues.

À cette fin, la recherche marine doit relever un défi majeur : acquérir des connaissances nécessaires pour prédire et anticiper les changements, mais aussi pour agir. Heureusement, de nouvelles approches techniques et scientifiques révolutionnent nos connaissances, à la fois en quantité et en qualité, sur la diversité spécifique et génétique, les interactions biotiques, la reproduction et le développement, le métabolisme et la physiologie, etc. Par exemple, les nouvelles techniques de séquençage des acides nucléiques offrent la possibilité de mieux connaître la diversité génétique des espèces et d'obtenir leurs génomes complets ainsi que leurs métagénomes – ceux des micro-organismes qui vivent en association

En France, la biomasse algale représente une valeur de plus de 500 millions d'euros de chiffre d'affaires

avec elles. Ces informations sont très utiles pour mener des travaux en épigénétique (*), étudier le métabolisme, comprendre les interactions des algues avec leur environnement et les organismes associés, ou pour sélectionner, sur la base de marqueurs génétiques, des variétés d'algues plus performantes ou plus résilientes face à un environnement changeant. Ces études vont nous aider à comprendre les fonctions des forêts d'algues et à mieux les restaurer. Récemment, ce type de travaux a permis de mieux caractériser le rôle biochimique des forêts d'algues à canopée (comme les laminaires et autres algues brunes géantes) dans les environnements côtiers. On savait déjà, depuis

(*) L'épigénétique correspond à l'étude des changements dans l'activité des gènes n'impliquant pas de modification de la séquence d'ADN en elle-même.

plus de soixante ans, que les algues libèrent une large proportion de leurs produits photosynthétiques sous forme de composés organiques dissous. En revanche, on ignorait encore le rôle écologique de ces vastes quantités de carbone libéré, dont la teneur augmente de près de 50 % dans les forêts d'algues par rapport aux eaux adjacentes, ni son devenir... Les nouvelles recherches ont montré que cela modifie la chimie de l'eau située au-dessus – la colonne d'eau –, ainsi que la productivité et la diversité des microbes qui s'y trouvent. Les laminaires et les autres algues brunes géantes sont des espèces fondatrices phototrophes : elles introduisent, dans l'écosystème, de la matière organique et de l'énergie issue de la lumière solaire, et modifient ainsi en profondeur les cycles du carbone et de l'azote, et la diversité des espèces qui en dépendent. Les champs d'algues changent la dynamique locale des nutriments en absorbant ceux qui sont inorganiques (nitrates, nitrites, phosphates) et en relâchant de l'ammonium. On a confirmé que les champs d'algues favorisent la régénération de l'azote en traçant ses isotopes naturels. Ces effets biogéochimiques des forêts d'algues sur l'eau de mer sont sans doute en partie dus aux riches communautés microbiennes qu'elles hébergent et qui recèlent probablement des métabolismes très divers.

DES OUTILS POUR RESTAURER LES ÉCOSYSTÈMES

La restauration des écosystèmes est depuis longtemps un outil clé pour inverser la perte d'habitat. Elle consiste à favoriser la régénération des habitats dégradés ou détruits, et à conserver les écosystèmes non dégradés. Toutefois, son efficacité sous les climats futurs est incertaine, car le réchauffement de l'océan empêchera le recrutement de nouveaux individus dans ces zones, comme cela a pu être observé au Chili. En effet, des forêts marines y ont été restaurées, mais la pollution par les rejets des mines de cuivre empêche les algues réimplantées de devenir productives. Face à cette difficulté, des techniques épigénétiques – ou génétiques – émergentes pourraient offrir de nouvelles stratégies, rendant

les algues plus aptes à s'adapter aux conditions environnementales prévues de demain. Par exemple, des études chez les laminaires montrent que l'on peut stimuler la résistance aux stress futurs (4). Pour cela, on exploite des mécanismes de réponses épigénétiques à la température de l'eau. Une hausse de température provoque la modification chimique de l'ADN des laminaires, dans certaines régions du génome associées chez ces algues à une tolérance accrue à ce stress. Cette tolérance se transmet même aux générations suivantes ! Ainsi, des semences de laminaires traitées par un excès de température au stade microscopique de la production de gamètes semblent générer, après la fécondation, des laminaires plus tolérantes à des températures excessives.

L'urgence de trouver des solutions pour le climat ne justifie pas le recours à l'ingénierie génétique

Ce phénomène de « potentialisation » est bien compris au niveau de ses mécanismes épigénétiques chez les plantes terrestres. D'autres options d'ingénierie écologique faisant appel à l'édition du génome de certaines algues brunes sont évaluées, notamment les ciseaux moléculaires (CRISPR). Cette technologie en est à ses balbutiements : nous l'utilisons pour des études fondamentales en biologie fonctionnelle sur les algues brunes, en laboratoire, à la Station biologique de Roscoff (5). Cependant, cette stratégie suscite des questions éthiques qu'il est urgent de débattre avant de la transposer à la restauration. En effet, les mêmes questions qui sont posées pour l'utilisation des techniques d'édition du génome en médecine ou en agriculture – la dissémination du patrimoine génétique à d'autres espèces – se posent avec l'introduction de souches d'algues génétiquement modifiées. Or, dans l'océan, l'impact de la dispersion est encore plus difficile à prévoir qu'autour des cultures terrestres... Pour rappel, des radeaux d'algues parcourent sans problème des milliers de kilomètres dans les océans !

En parallèle de ces stratégies de restauration, certains veulent utiliser les algues comme un moyen de décarboner l'atmosphère. L'objectif est de cultiver massivement des grandes algues ou d'utiliser des stocks d'algues sauvages pour les couler dans les grands fonds océaniques, en dessous de 2 000 mètres. L'oxygène étant très rare dans ces eaux profondes, cette matière organique ne pourrait pas être complètement décomposée, séquestrant son carbone pour des milliers d'années.

CAPTER LE CARBONE ?

Cette idée est largement mise en avant aujourd'hui pour attirer des investisseurs dans le « carbone bleu ». Toutefois, ces projets sont particulièrement inquiétants, car ils ignorent les conséquences de cet enfouissement sur le fonctionnement des écosystèmes profonds. Le risque est de modifier, voire de détruire, ces écosystèmes dont on connaît encore très mal la biodiversité et le fonctionnement (6). Mais les risques sur les systèmes côtiers au large desquels ces projets de cultures d'algues massives voudraient se concentrer sont tout aussi importants. Certains projets envisagent d'utiliser les zones pauvres en éléments minéraux nutritifs des tourbillons océaniques de l'Atlantique tropical pour les ensemercer volontairement avec des algues brunes pélagiques du genre *Sargassum*, puis de les couler une fois qu'elles se sont développées.

Mais ces algues prolifèrent déjà trop, profitant de ressources nutritives en excès. Elles engendrent des millions de tonnes de biomasse à la dérive, qui finit par s'échouer massivement sur les plages paradisiaques des Caraïbes et du Golfe du Mexique et y pourrit, libérant des gaz soufrés toxiques. Faut-il donc encore accroître la biomasse de ces algues qui menacent la santé humaine et impactent durablement les écosystèmes côtiers et l'économie touristique ?

L'urgence de trouver des solutions pour endiguer le changement climatique ne justifie pas le recours à l'ingénierie génétique ou à l'immersion délibérée d'algues dans les profondeurs océaniques, sans en évaluer scientifiquement les conséquences. Les investissements seront bien mieux utilisés à faire avancer nos

Un atout pour la sécurité alimentaire

Mise en avant pour l'anniversaire des 150 ans de la Station biologique de Roscoff, une découverte majeure a placé l'algue rouge de type *Porphyra* (le nori japonais) au cœur des recherches sur l'évolution du microbiote intestinal en lien avec l'alimentation. En 2010, Jan-Hendrik Hehemann et Gervan Michel ont constaté qu'une enzyme permettant de mieux digérer les sushimakis est présente dans une bactérie du microbiote intestinal des populations asiatiques, mais pas dans celui des populations occidentales (1). Cette présence résulte d'un transfert de gènes d'une bactérie marine à une souche asiatique de bactérie intestinale. La digestion des algues par ces bactéries produit des acides gras à chaîne courte qui agit sur le métabolisme et le système immunitaire du consommateur, influant



▲ Au Japon et en Corée, les algues marines entrent dans la composition de nombreux plats. Les algues apportent de nombreux bienfaits pour la santé. Ici, une salade à base d'algues vertes.

donc sur sa santé. C'est une des raisons pour lesquelles obésité, cancers et maladies cardiovasculaires sont bien moins fréquents au Japon et en Corée, où les algues font partie du régime traditionnel, que dans les pays occidentaux. Le contenu chimique des algues et les avantages pour la santé de chaque substance bioactive sont

bien documentés dans la littérature scientifique (2). Toutes les macro-algues sont comestibles : elles sont riches en micronutriments, minéraux, fibres, protéines, vitamines, oligo-éléments, etc. Beaucoup d'algues sont prisées pour leurs saveurs uniques, comme l'umami. Bien que l'exploitation des macro-algues en

Occident se soit surtout concentrée sur l'extraction industrielle d'ingrédients gélifiants (alginates, agars, carraghénanes...), l'utilisation de ces algues comme aliments (légume de mer ou condiment) et ingrédients santé a suscité un intérêt croissant au cours des dernières décennies. La mariculture des grandes algues se développe également ; elle seule pourra répondre aux besoins croissants en qualité et en quantité, et contribuer ainsi à la sécurité alimentaire globale. L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation en fait une priorité et soutient cette ambition, que relaie une coalition mondiale sous l'égide de l'ONU pilotée scientifiquement depuis Roscoff par le CNRS. P.P.

(1) J.H. Hehemann et al., *Nature*, 464, 908, 2010.
(2) M.L. Wells et al., *Journal of Applied Phycology*, 29, 949, 2017.

connaissances sur les contributions des algues sauvages et cultivées dans le devenir du carbone, la décarbonation de l'agriculture terrestre et la sécurité alimentaire globale, plutôt qu'à des stratégies infondées de compensation carbone. Heureusement, deux nouveaux projets exploratoires vont nous permettre d'avancer dans ce sens : le projet Traversing European Coastlines (Trec) du Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL) (7), associé au projet européen BiOcean5D. Il s'agit d'une grande expédition visant à explorer des écosystèmes côtiers européens, dont les forêts d'algues,

et à étudier leurs réponses aux changements environnementaux, de la molécule à la communauté. Gageons que ces recherches nous apporteront de nouvelles pistes pour préserver les forêts d'algues et toutes leurs fonctions. ■

(1) T.D. Dillehay et al., *Science*, 587, 784, 2008.

(2) K. A. Krumhansl et al., *PNAS*, 113, 13785, 2016.

(3) N. Arafeh-Dalmau et al., *Front. Mar. Sci.*, 6, 409, 2019.

(4) A. Jueterbock et al., *Front. Mar. Sci.*, doi:10.3389/fmars.2021.658458, 2021.

(5) Y. Badis et al., *New Phytologist*, doi: 10.1111/nph.17525, 2021.

(6) A. M. Ricart et al., *Environ. Res. Lett.*, 17, 081003, 2022.

(7) www.embl.org/about/info/trec

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Vincent Doumeizel, *La Révolution des algues*, Équateurs, 2022.