Préface
Philippe Poupon

Anaïs Joseph
avec Philippe Goulletquer

UN OCÉAN DE PROMESSES

Copyright © 2017 Editions Quæ

Cette mer qui nous nourrit, nous soigne, nous donne l'énergie… au Quotidien

éditions Quæ

Copyright © 2017 Editions Quae.

UN OCÉAN DE PROMESSES

Cette mer qui nous nourrit, nous soigne,
nous donne l'énergie… au quotidien

Copyright © 2017 Editions Quae.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Anaïs Joseph
Avec Philippe Goulletquer

UN OCÉAN DE PROMESSES

Cette mer qui nous nourrit, nous soigne, nous donne l'énergie… au Quotidien

Éditions Quæ

Copyright © 2017 Editions Quae.

Cette collection s'adresse à un large public, non spécialiste des sujets traités mais curieux de comprendre l'actualité. Sous la direction d'un expert scientifique, les ouvrages sont écrits par des journalistes dans un style vivant et très accessible, et couvrent des questions de société variées, comme l'alimentation, la santé, l'environnement, les nouvelles technologies... Une collection originale par son choix d'aborder ces problématiques sous l'angle de leur impact dans notre vie quotidienne.

Dans la même collection

Des drones à tout faire ?
Ce qu'ils vont changer dans ma vie au quotidien
Isabelle Bellin, avec Sylvain Labbé
2016, 200 pages

L'eau en péril ?
Une ressource à préserver au quotidien
Denis Lefèvre, avec Vazken Andréassian
2016, 168 pages

Des insectes au menu ?
Ce qui va changer dans mon alimentation au quotidien
Vincent Albouy, Jean-Michel Chardigny
2016, 184 pages

Le changement climatique
Ce qui va changer dans mon quotidien
Hélène Géli, Jean-François Soussana
2015, 168 pages

© Éditions Quæ, 2017
ISBN : 978-2-7592-2691-7

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6e.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Sommaire

Remerciements 6
Préface 7
Le grand chamboulement 9
Sauvé par le krill 10
Un océan à bout de souffle 14
La chimie verte vire au bleu 20
Vers la fin du 7e continent 21
Champs et bêtes au régime des algues 27
La mer à tout faire 32
La mer dans nos assiettes 38
Pêche durable ou consommateur raisonnable ? 39
L'aquaculture : planche de salut ou radeau de la méduse ? 49
Algues et méduses : chaud devant ! 58
La mer à notre chevet 63
Les redoutables antidotes de la mer 64
Du sang d'annélide au dispositif médical 72
Des vers de Pompéi pour se pomponner 78
Encadrer l'exploitation et redistribuer les bénéfices 81
Plus besoin de terre ferme ! 88
Construire vert c'est bien, bleu c'est encore mieux ! 89
neuf milliards de touristes en mer 95
« Au commencement étaient les épices » 102
Une Toile sous-marine qui vaut de l'or 107
Les mines se vident, cap sur la mer ! 111
La ruée vers le sable 112
Les minéraux tant convoités 118
La fièvre de l'or noir patine dans l'océan blanc 126
Hydrates de gaz : *Dr. Jekyll* ou *Mr. Hyde* ? 128
L'exploitation… des droits mais aussi des devoirs 132
Les énergies marines renouvelables (EMR) 136
En mer, Éole est plus fort 138
On a trouvé le courant 144
Les moulins à marée 149
Vague, température, sel, faites vos jeux ! 152
Des évolutions possibles pour les énergies marines 159
Conclusion 163
Postface 165
Pour en savoir plus 167

Copyright © 2017 Editions Quae.

Remerciements

Nous remercions vivement tous les chercheurs qui ont contribué à ce livre, ainsi que Philippe Goulletquer, coordinateur scientifique de cet ouvrage.

Sophie Arnaud-Haond, chercheur à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), Station de Sète, UMR Marbec.

Sylvia Colliec-Jouault, biochimiste à l'Ifremer, Centre Atlantique, laboratoire Écosystèmes microbiens et molécules marines pour les biotechnologies, Nantes.

Cyrille P. Coutansais, directeur de recherches du Centre d'études stratégiques de la Marine (Cesm), Paris.

Nicolas Desroy, chercheur à l'Ifremer, laboratoire Environnement Ressources de Bretagne Nord, Cresco, Dinard.

Yves Fouquet, géologue à l'Ifremer, Centre Bretagne, responsable du laboratoire Géochimie et métallogénie, unité Géosciences marines, Plouzané.

Didier Gascuel, ingénieur agronome à Agrocampus Ouest, directeur du Pôle halieutique, Rennes.

Michel Paillard, ingénieur spécialiste des énergies marines, à l'Ifremer, Centre Bretagne, retraité.

Sylvain Pioch, maître de conférences, R&D Biodiversité marine au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cefe), UMR 5175, Montpellier.

Jean-François Sassi, manager Groupe Biomasse 3G (procédés et technologies des microalgues) au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), Centre de Cadarache, Saint-Paul-lez-Durance.

Nabil Sultan, responsable à l'Ifremer, Centre Bretagne de l'unité Géosciences marines, Plouzané.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Préface

Je suis né les pieds dans l'eau, nourri de poissons et de crustacés, ma passion est devenue la voile et la mer. J'ai sillonné les océans du monde à la force d'Éole, de l'Arctique à l'Antarctique, du Pacifique à l'Atlantique, mais très humblement, je ne les connais pas. Qui peut prétendre connaître la mer ? Il faut des vies et encore d'autres pour la comprendre et découvrir toutes ses richesses.

J'aime me promener dans les ports, voir tous ces bateaux, à Djibouti les cargos qui déchargent le charbon, en Érythrée les boutres qui embarquent les chameaux ou au Guilvinec les chalutiers qui rentrent les cales pleines de poissons pêchés en mer d'Irlande. Partout dans le monde, j'ai rencontré des pêcheurs, sur les plages du Brésil, à pied avec leurs filets, en Haïti sur leurs frêles pirogues, en Polynésie armés de harpons sur leurs poti marara, mais aussi des chalutiers russes ou japonais dans les mers les plus reculées du Pacifique Sud et de l'Antarctique. Les hommes labourent sans cesse cette mer avec leurs grands filets et leurs chaluts. La mer nourricière, la mer porteuse de ces milliers de boîtes empilées sur le pont des porte-conteneurs, la mer d'où l'on extrait le pétrole. L'océan est exploité, nous devons édicter des règles pour que nos enfants puissent encore en tirer leur nourriture, extraire les richesses enfouies dans les grands fonds et garder leurs rêves.

Pour l'Ifremer, nous rendons compte de ces observations à travers le monde. Avec nos petits capteurs placés à l'arrière du bateau, nous enregistrons la température et la salinité de l'eau depuis maintenant neuf ans sur plus de 80 000 milles de navigation autour du monde. Une aide précieuse à la compréhension de nos océans.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Nous avons besoin des scientifiques qui décortiquent la mer, avec des sondes, des robots ou par satellites pour mieux la connaître. Grâce à eux, nous avons des chiffres pour les quotas de pêche, grâce à eux, nous découvrons les richesses du fond des océans. Ils inventent les hydroliennes pour nous éclairer et nous alarment sur le réchauffement climatique.

Dans notre pays, nous avons pris conscience des problèmes environnementaux. Acteurs et amoureux de la mer, nous devons agir pour la protection des océans. Respecter les dunes et les zones sensibles proches de la mer, respecter les quotas de pêche qui se révèlent efficaces, gérer nos déchets. Il est possible de trouver un équilibre en profitant de la mer et en préservant ses richesses.

C'est l'un des enjeux des années à venir, éduquer les populations côtières, les pêcheurs professionnels ou les amateurs pour que l'équilibre permette aux poissons de se reproduire et, à nous, de limiter la pollution. Mais les gros problèmes sont ailleurs, loin de nos côtes, loin de notre France. Les pays en développement sont malheureusement en retard sur tous ces points, il nous faut les aider dans cette voie, pour que la mer ne soit plus une poubelle et pour sauvegarder les poissons et autres ressources.

À bord de *Fleur Australe*, nous essayons de raconter la mer, ceux qui vont dessus, ceux qui vont dessous, ceux qui la protègent. Nous voulons sensibiliser le plus grand nombre à cette richesse qui est mise en danger par l'homme lui-même. Nous souhaitons la faire connaître pour mieux la comprendre et mieux la protéger. Nous voulons aussi donner du rêve, une philosophie, une sagesse que j'ai trouvée en mer, loin des côtes, loin du monde, mais aussi en marchant sur la plage, les pieds dans l'eau.

Philippe Poupon
Navigateur

Copyright © 2017 Editions Quae.

1

LE GRAND CHAMBOULEMENT

« Nos océans nous nourrissent,
nous protègent, régulent notre climat… »

Barack Obama
2016 Our Ocean Conference

En lisant « poumon vert de la Terre », vous penserez aussitôt aux forêts et en particulier à l'Amazonie. Cette association est bien naturelle aux animaux terrestres que nous sommes : l'oxygène atmosphérique vient principalement des organismes photosynthétiques avec pour chef de file, les arbres. Mais en réalité, l'océan est au cœur de cette dynamique grâce au phytoplancton. En émettant de l'oxygène depuis des milliers et des milliers d'années, les organismes marins ont fortement contribué à la production d'oxygène. De nos jours, près de 50 % de l'oxygène proviennent des océans.

Par ailleurs, l'océan a absorbé un quart des émissions anthropiques de gaz carbonique (CO_2) depuis l'ère industrielle, soit 135 milliards de tonnes ! À la fois destructeur de dioxyde de carbone et pourvoyeur d'oxygène, l'océan est pour nous autres humains un grand bol d'air. Le rôle clé qu'il joue dans la régulation de la composition de l'atmosphère est aujourd'hui mis en péril. La détérioration

Copyright © 2017 Editions Quae.

de ses fonctions pourrait avoir un effet rétroactif : l'amplification des impacts du changement climatique.

Les premières espèces menacées par ces détériorations sont bien sûr les habitants de la mer. De la plus grande espèce sur terre, la baleine bleue, jusqu'à la plus petite forme de microbe, l'océan recèle une prodigieuse biodiversité… mais pour combien de temps encore ? Face aux menaces climatiques, les espèces n'ont d'autres choix que de migrer, s'adapter ou périr. Dans tous les cas, il faut s'attendre à ce que l'océan, tel que nous l'avons connu, ne soit plus le même en 2100.

SAUVÉ PAR LE KRILL

Vous n'avez peut-être jamais entendu parler du krill alors que son éminente représentante *Euphausia superba* est l'une des espèces les plus abondantes sur terre. Le krill, qui regroupe 85 espèces de petits crustacés zooplanctoniques, est l'une des dernières grandes ressources sauvages de la planète. *Euphausia superba* ressemble à une petite crevette ayant la particularité d'émettre de la lumière pendant quelques secondes dans certains points de son corps. Lorsque 10 000 à 30 000 individus par mètre cube se regroupent en essaim, cela forme alors d'étranges constellations mouvantes. Présent dans toutes les mers du globe, le krill constitue dans l'océan Austral une source importante de nourriture pour les cétacés, les phoques, les manchots, les calmars et les poissons. C'est une espèce clé de cet écosystème. Depuis les années 1970, sa population a diminué de 80 %, voire 90 %, d'après les estimations. Les scientifiques sont partagés quant à la véritable cause de cet effondrement : acidification des océans ? changement climatique ? recrudescence des prédateurs (les baleines) ?… sans parler de la surpêche qui cible ces espèces ! Effet

Copyright © 2017 Editions Quae.

conjugué de ces différents facteurs ? Quelles que soient les causes passées, le changement climatique pourrait à l'avenir avoir une influence majeure. Selon une étude parue en 2016 dans *Geophysical Research Letters*, la fonte des glaces et le réchauffement pourraient réduire de 80 % l'habitat des krills d'Antarctique d'ici la fin du siècle. Habituellement, les juvéniles se réfugient sous la calotte glaciaire formée au début de l'hiver afin d'y trouver un abri et des algues pour se nourrir. Selon les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), cette glace devrait se constituer avec un retard de 90 jours d'ici 2100. Le GIEC prévoit également une élévation de 2 °C à la surface de l'océan Austral. Les petites larves, qui remontent pour chercher de la nourriture après avoir éclos à des profondeurs de 1 000 mètres, pourraient ne pas supporter un tel différentiel.

L'Antarctique est une nappe blanche cousue de fils noirs que les scientifiques tentent de mettre au jour. Sans la topographie du plancher océanique et l'épaisseur de la glace, il est compliqué de l'étudier. Aussi, ce fut une surprise générale en avril 2017 lorsque des glaciologues américains démontrèrent l'existence d'un vaste réseau de voies praticables sur les plateaux de glace. Leur étude, publiée dans la revue *Nature*, dénombre près de 700 cours d'eau saisonniers dont certains atteignent 120 kilomètres de long. Les scientifiques ne s'attendaient pas à trouver un maillage aussi dense et étendu. Pour parvenir à ce résultat, les glaciologues ont rassemblé les données extraites d'images satellitaires, de photos prises d'avions militaires et de notes inscrites dans les journaux centenaires d'explorateurs polaires comme Robert Falcon Scott qui mena la tragique expédition *Terra Nova* (1910-1913). Certaines des chutes d'eau, recensées dans l'étude de l'université de Columbia, existaient avant le changement climatique

Copyright © 2017 Editions Quae.

mais les scénarios prévoyant l'évolution de l'Antarctique s'en trouvent modifiés. Par exemple, l'écoulement de l'eau sur de longues distances accentue la fonte des glaces, ce qui pourrait intensifier les impacts du changement climatique. Aussi, malgré ces incertitudes, tous les indicateurs vont dans le sens d'une dégradation du milieu dans lequel évolue *Euphausia superba.*

Menacé par le réchauffement climatique, le krill l'est aussi par la pêche. Une fois à bord des bateaux-usines de Norvège, Pologne, Russie, Chine, Corée du Sud et Japon, *Euphausia superba* est transformé en farine ou en tablettes pour la consommation des animaux d'élevage. La production de farine et d'huile à base de poisson étant en recul, le krill est apparu à certains comme une nouvelle source d'acides gras. D'après les chiffres de l'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), 300 000 tonnes de krill antarctique ont été prélevées en 2014, un niveau jamais atteint depuis le début des années 1990 suite à la création de la Commission pour la conservation de la faune et de la flore marine de l'Antarctique (CCAMLR). Cette commission avait été établie, en 1982, dans l'objectif de faire face à l'intérêt commercial grandissant pour le krill, l'une des principales ressources de l'écosystème de l'Antarctique. Toutefois, les mesures de conservation engagées n'ont pas été assez significatives contrairement à celles des États-Unis où la pêche au krill est interdite depuis 2009 sur la côte ouest. Pour les Américains, l'objectif était de préserver les pingouins qui se nourrissent quasi exclusivement de krill, les baleines bleues qui en avalent quatre tonnes par jour et l'écosystème marin dans son ensemble. D'après *Mission Bleue*, l'organisation de la célèbre océanographe Sylvia Earle, le retour de 2 200 baleines bleues le long de la Californie, serait en partie lié à la sauvegarde du krill. Autour du

Copyright © 2017 Editions Quae.

globe, c'est le seul signe de reconstitution d'une population du plus grand des cétacés.

Fin 2016, la Convention sur la conservation de la faune et la flore marines de l'Antarctique a finalement obtenu des plus réticents (la Chine et la Russie) un accord pour protéger efficacement le krill en Antarctique : le consentement à la création d'un sanctuaire marin. Une vaste échancrure sur la côte ouest du continent a été désignée « aire marine protégée » (AMP). Elle est située dans la mer de Ross considérée comme « le dernier océan » indemne des effets de l'activité humaine. Cette mer abriterait 38 % des manchots Adélie, 25 % des manchots empereurs, 30 % des pétrels antarctique, 6 % des baleines Mink… C'est aussi une zone abondante de krill et de légine, poisson très apprécié surnommé « l'or blanc » de l'Antarctique. Ces enjeux économiques rendaient nécessaire la création d'un sanctuaire marin. Avec 1,57 million de kilomètres carrés, c'est l'équivalent de la France, de l'Allemagne et de l'Espagne réunis qui a été sanctuarisé, soit la plus grande aire marine protégée au monde. Perçue comme un éden par les naturalistes, cette zone devrait permettre au krill de n'avoir plus qu'une pression à subir, celle du changement climatique — pendant 35 ans au moins — car l'accord signé est limité dans le temps. Autre bémol : l'interdiction totale de pêche n'est valable que sur 1,12 million de kilomètres carrés. On pourrait s'attendre à ce que toute forme de pêche soit prohibée mais non, la réglementation au sein des AMP dépend du statut de chaque zone considérée. En France par exemple, 22 % du domaine marin sont classés « aire marine protégée » mais chacune des aires prises séparément répond à une réglementation différente : site *Natura 2000*, parc naturel, parc national, réserve naturelle, zone de protection de biotope, sanctuaire *Pelagos* (Méditerranée) ou *Agoa* (Antilles).

Copyright © 2017 Editions Quae.

Dans certains cas, les réglementations se rapprochent d'une mise sous cloche de l'environnement mais, dans la plupart des cas, elles tentent de faire coexister protection et exploitation raisonnable. À l'Agence française pour la biodiversité (AFB), des démarches sont engagées afin d'harmoniser ces systèmes et de donner une vision claire de la vocation d'une aire marine protégée. En attendant, dans la mer de Ross, la création d'une aire marine protégée est un signe fort qui scelle pour la première fois un accord entre 24 États sur un espace marin n'appartenant à personne.

UN OCÉAN À BOUT DE SOUFFLE

L'océan, une pompe à carbone qui se trouve à bout de souffle. Depuis l'ère industrielle, l'océan a permis d'atténuer l'effet de serre en soustrayant de l'atmosphère un quart du CO_2 émis par les hommes, mais ce « service rendu » a un coût : l'acidification de l'eau de mer. La dissolution du CO_2 dans la mer a entraîné en particulier une augmentation de 30 % de l'acidité des océans. Si les émissions humaines se poursuivent au rythme actuel, l'acidité pourrait augmenter de 170 % par rapport au niveau préindustriel… Plusieurs travaux scientifiques ont montré que ce phénomène rendait plus difficile la fabrication des structures calcifiées, pourtant nécessaires aux coraux, aux mollusques et au phytoplancton. Les foraminifères (organismes planctoniques) et les ptéropodes (mollusques planctoniques) sont parmi les plus fragiles. Des études menées en laboratoire ont également démontré que ce phénomène limitait la calcification de la moule comestible (*Mytilus edulis)* et de l'huître du Pacifique *(Crassostrea gigas)*. Si l'on projette ces résultats en l'an 2100, période à laquelle les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère auront doublé, d'après les esti-

Copyright © 2017 Editions Quae.

mations du GIEC, la moule construira sa coquille 25 % moins rapidement qu'aujourd'hui (l'huître, 10 %). D'ores et déjà, les ostréiculteurs au Nord-Ouest des États-Unis enregistrent depuis 2006 de fortes mortalités. Une étude menée avec l'écloserie de Whiskey Creek, dans l'Oregon, relie ces mortalités d'huîtres à la baisse du pH de l'eau de mer.

Parce qu'elle empêche la construction des squelettes calcifiés, l'acidité océanique limite la croissance du corail. Emblématique de la détérioration du milieu océanique, cet organisme est doublement affecté par les émissions anthropiques : l'acidification altère son développement et le réchauffement climatique le détruit. Lorsque le milieu n'est pas perturbé, le corail vit en symbiose avec une microalgue appelée zooxanthelle. À travers la photosynthèse, celle-ci transforme l'énergie lumineuse en une énergie chimique qui prend la forme de sucres, d'acides aminés et autres composés organiques vitaux pour le corail. « Stressé » par l'élévation des températures, le corail expulse son hôte et les pigments qu'il contient. Devenu translucide, l'animal laisse apparaître la blancheur de son squelette. On parle de blanchiment du corail. Si la température ne redescend pas rapidement, le corail meurt progressivement, faute d'énergie et de nutriments. Le blanchiment massif des coraux en cours, en 2017, représente le 4e épisode mondial de ce processus depuis 1997 ! On considère que 20 % des coraux ont ainsi été détruits, 15 % sont endommagés et risquent de disparaître d'ici 10 ans et 20 % sont menacés d'ici 40 ans. En 1998, *El Niño* a fortement réchauffé les eaux de surface du Pacifique équatorial, générant la disparition d'au moins 16 % des récifs de la planète en six mois. Au milieu du siècle, la moitié des plus grands ingénieurs sur terre, à l'origine d'une barrière de 2 300 kilomètres de long en

Copyright © 2017 Editions Quae.

Australie et de 1 600 kilomètres en Nouvelle-Calédonie, — par ailleurs classée au patrimoine mondial de l'Unesco — pourrait avoir disparu. Alors qu'ils couvrent moins de 0,2 % de la superficie des océans, les récifs coralliens abritent environ un tiers de toutes les espèces marines connues à ce jour. Cette oasis de vie aide 500 millions d'humains à subvenir à leurs besoins par la pêche et garantit de nombreux services : protection des côtes contre l'érosion, tourisme…

Tous les scientifiques s'accordent à dire que le paysage marin de 2100 ne pourra pas être celui que l'on connaît aujourd'hui. Au-delà des coraux tropicaux emblématiques, les régions polaires présentent d'ores et déjà les changements les plus abrupts, deux fois plus rapides que dans l'océan mondial. Reste à savoir s'il y a encore une chance de maintenir en 2100 les fonctions écologiques et les services aujourd'hui remplis par les coraux. Les recherches ne sont pas assez nombreuses et longues pour émettre des conclusions robustes mais de récentes observations montrent que certains coraux parviennent à s'adapter. C'est le cas de *Acropora hyacinthus*, une espèce dotée d'un pied puissant, surmonté d'une forme tabulaire. Il existe un large éventail de formes et de couleurs chez les 400 espèces de corail recensées : le corail choufleur dont la forme en boule évoque bien sûr le légume, le corail de feu en plaque qui possède des sortes de flammèches piquantes comme des méduses, ou encore, *Acropora hyacinthus* avec son allure de champignon plat pouvant occuper jusqu'à 5 mètres de diamètre. En 2014, des biologistes de la station marine Hopkins à l'université de Stanford ont montré que cette espèce pouvait résister à des températures de 35 °C. Depuis, plusieurs études tentent de comprendre les mécanismes d'acclimatation observés chez certaines espèces. *Tara Océans*, le populaire

Copyright © 2017 Editions Quae.

navire destiné à la recherche scientifique, est parti en 2016 pour deux années de missions portant précisément sur ce sujet.

Tout comme certaines espèces semblent mieux tolérer la montée du mercure, une récente recherche du Centre d'excellence d'études du corail récifal montre qu'une adaptation à l'acidification est possible. Les spécialistes de l'université d'Australie occidentale ont découvert chez certaines algues encroûtantes une modification dans leurs réponses chimiques à la baisse du pH. Appelées corallines, ces algues rouges sont essentielles pour consolider les édifices coralliens. Imprégnées de calcaire, elles prennent parfois un aspect pierreux. Sous nos latitudes, on les retrouve sous la forme de tâches rosâtres sur des substrats rocheux, des algues ou des posidonies (herbes marines). L'étude australienne montre que plusieurs corallines auraient une capacité d'adaptation. Sur ce sujet, les études réalisées depuis une dizaine d'années n'aboutissent pas toujours à des résultats cohérents. Ainsi, l'espoir suscité chez certains spécialistes par la découverte de ces formes d'adaptation n'est pas partagé par tous : « Ce ne sont pas quelques espèces de corail résistantes qui permettront de maintenir les récifs coralliens tels qu'on les connaît aujourd'hui » rappelle Jean-Pierre Gattuso, directeur de recherches au CNRS et grand spécialiste de l'acidification des océans à l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer. D'ailleurs, la stratégie mondiale de préservation des océans n'est pas ciblée sur les espèces mais sur les écosystèmes dans leur globalité. Chaque État signataire de la Convention sur la biodiversité biologique a pour objectif de transformer 10 % de ses eaux marines en aires marines protégées d'ici 2020. Par ailleurs, pour envisager pleinement les facultés d'adaptation des organismes marins à long terme, des perturbations autres que celle de l'acidité sont également à prendre en compte :

Copyright © 2017 Editions Quae.

outre le réchauffement de l'eau de mer (0,7 °C depuis cent ans et jusqu'à 3 °C d'ici 2100), l'autre perturbation d'ordre global est la désoxygénation de l'océan.

Aujourd'hui, la photosynthèse du phytoplancton marin a produit au cours de millions d'années la moitié de l'oxygène que nous respirons. En 2100, l'océan pourrait perdre 1 à 7 % de sa quantité globale d'oxygène. Plusieurs phénomènes interagissent. Le plus connu est certainement l'eutrophisation, c'est-à-dire la prolifération d'organismes photosynthétiques jusqu'à l'étouffement d'un milieu. En zone côtière, l'eutrophisation liée aux activités humaines (en particulier l'agriculture qui utilise des fertilisants chimiques et les eaux usées riches en nutriments pour les algues) a parfois donné lieu à de spectaculaires « zones mortes » (*voir « La mer dans nos assiettes »*). Lorsque de tels phénomènes surviennent, les responsables politiques prennent des mesures locales ou régionales pour limiter les apports en nutriments dans les rivières et estuaires. Au large, la diminution de l'oxygène est moins visible et plus insidieuse. Ce sont les lois de la chimie qui répondent au réchauffement climatique : une élévation de la température diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Elle modifie également la densité de l'eau avec pour conséquence un ralentissement des échanges entre les eaux de surface et de profondeur. Sans ce brassage, l'oxygène qui est dissous en surface pénètre moins facilement les eaux intermédiaires (200 à 2 000 mètres). Dans les régions tropicales où la quantité d'oxygène dissous diminue fortement, on parle de « zone minimum d'oxygène ». Dans l'Est de l'Atlantique tropical, ce plafond remonte d'un mètre par an depuis 50 ans. Cela « comprime » l'habitat des poissons.

Le plus inquiétant dans le trio destructeur « désoxygénation, acidification, réchauffement » est la mise en danger

Copyright © 2017 Editions Quae.

du rôle tampon que joue l'océan en absorbant un quart du gaz carbonique atmosphérique émis. Ces changements des propriétés physico-chimiques des eaux marines ont autant de conséquences sur le rôle de « pompe » à gaz carbonique que sur celui du transfert de la matière organique photosynthétisée vers les grands fonds. Si l'on ajoute les autres facteurs d'altération (pollution, surpêche, exploitation), l'impact global est jugé bien supérieur à la simple addition des facteurs pris individuellement. À l'avenir, les niveaux de réponse seront différents selon les zones et les problèmes concernés. Mais pour ne pas compromettre davantage le rôle vital des océans pour les organismes terrestres, il est important de comprendre globalement ces phénomènes et d'y répondre collectivement.

Que faire ?

Le site Internet *Lemonsea* (www.lemonsea.org), créé par de jeunes universitaires français engagés pour la protection des océans, propose cinq gestes simples pour limiter l'acidification de la mer.

Copyright © 2017 Editions Quae.

2

LA CHIMIE VERTE VIRE AU BLEU

Tous les indicateurs démontrent un glissement d'une économie jusqu'à présent basée sur des matières premières fossiles vers une économie tablant sur des matières premières renouvelables. En Europe, l'Union s'est dotée du cadre REACH (enRegistrement, Évaluation et Autorisation des produits CHimiques) a pour objectif la protection vis-à-vis des substances chimiques. Certaines devraient progressivement être interdites tandis que d'autres ne devront pas dépasser des seuils limites. Concernant la France, l'industrie de la chimie s'est engagée au Grenelle de l'environnement à diminuer de moitié l'usage de matières fossiles d'ici 2050.

Dans le paysage de la chimie verte en devenir, les matières végétales terrestres — considérées comme renouvelables — auront leur place. Mais les ressources marines ont plusieurs avantages : elles n'occupent pas les terres arables et se développent rapidement dans des conditions extrêmes (températures, pressions…) proches de celles qu'atteignent les processus industriels. Alternatives potentielles aux carburants fossiles, les algues sont sous le feu des projecteurs. Notez aussi qu'elles servent déjà à protéger les cultures et les élevages et permettent ainsi de limiter l'usage d'antibiotiques ou de pesticides. Demain, les bactéries

Copyright © 2017 Editions Quae.

marines pourraient produire un plastique biodégradable et des peintures écologiques. Les méduses pourraient servir à la fabrication des couches jetables…

La mer et ses ressources naturelles pourraient favoriser l'émergence de nouveaux matériaux grâce aux biotechnologies et au biomimétisme. Notre histoire est faite de révolutions : après la révolution industrielle et la révolution verte, poussées par les avancées de la chimie de synthèse, nous entrons progressivement dans une ère bleue basée sur les biotechnologies et la bioéconomie.

VERS LA FIN DU 7e CONTINENT

Il existe quelque part entre le Japon et la côte ouest des États-Unis un 7e continent. Les différents courants marins ont drainé jusqu'ici tous les déchets plastiques abandonnés à la mer : fragments de bidons d'huile, de tubes de crème, de briquets, de mégots…, la liste s'étend jusqu'à former une grosse soupe de plastique épaisse, deux fois plus grande que la France. Ce continent « liquide » a été traversé pour la première fois en 1997 par le navigateur Charles J. Moore alors qu'il empruntait une route maritime inhabituelle. Depuis, quatre autres zones similaires ont été identifiées autour du globe. Selon une ritournelle populaire le plastique est fantastique, mais en réalité, il est surtout très résistant. En mer, le polyéthylène (PE) utilisé pour les emballages devient pluri-centenaire. À force d'éroder et de corroder les objets en plastique qui l'habitent, l'océan parvient à les fragmenter en petits morceaux. Ils deviennent alors invisibles mais polluent de manière encore plus insidieuse l'écosystème en s'immisçant aisément dans les organismes vivants.

Des images chocs montrant des tortues prisonnières des filets abandonnés par les pêcheurs ou des albatros étouffés

Copyright © 2017 Editions Quae.

par l'ingestion de bouchons et sacs plastique ont permis de sensibiliser le public. Le long des plages sauvages, des campagnes de ramassage s'organisent. Sur les plages municipales, les pouvoirs publics nettoient le sable avec de gros tracteurs tamiseurs. Des projets un peu fous sont lancés par des navigateurs engagés ou des inventeurs comme l'association anglaise Seawax qui a dessiné un bateau alimenté par l'énergie du soleil et du vent pour glaner 150 tonnes de débris par sortie. Celui des Sea Cleaners qui tente de rassembler les fonds nécessaires pour construire un quadrimaran doté d'une grande herse de 70 mètres afin de ratisser la surface des eaux du littoral. Mais au cœur des océans, dans des eaux maritimes n'appartenant à personne, seuls les plus utopistes envisagent des projets titanesques : Boyan Slat, un jeune étudiant en aéronautique, a réussi à convaincre une centaine de scientifiques à rejoindre son organisation Ocean Clean Up pour construire un radeau géant en forme de V. Un prototype a déjà été testé au large des côtes des Pays-Bas. Poussé par les courants concentriques, le radeau passif d'un point de vue énergétique, ratisserait les détritus en faisant des ronds dans l'eau. L'équipe continue ses recherches et vise 2020 pour la construction d'un engin long de 100 kilomètres. Le radeau pourrait alors nettoyer en dix ans la moitié du gyre (continent de plastique) du Pacifique Nord.

Irréalistes pour certains, ces projets sont pour l'heure insignifiants au regard des 8 millions de tonnes de plastiques déversées en mer chaque année, soit l'équivalent d'un camion-poubelle toutes les minutes. Dans un scénario *Business as usual*, on passe en 2030 à 2 camions par minute et en 2050 à 4 camions par minute. Quelle pourrait être la solution ? Un bouleversement dans notre mode de consommation ? Il est peut-être à l'œuvre *(voir « Plus besoin de terre ferme ! »)* mais, en attendant, les

Copyright © 2017 Editions Quae.

industriels voient plutôt dans cette situation l'émergence d'un nouveau marché. Au niveau médiatique, Adidas a dégainé le premier en sortant la première chaussure en fibre recyclée de plastique marin en 2017. Un bon coup de pub sous couvert de sensibilisation. Moins glamour, Ecover, la marque belge de produits d'entretien écologiques, lançait en 2014 une gamme de bouteilles incorporant 10 % de plastique marin recyclé. En 2017, au tour du géant Procter & Gamble de lancer la première série de flacons de shampoing avec 25 % de plastique marin. Mais le recyclage n'est pas la panacée. La logique voudrait que l'on s'attaque à la source des pollutions. Une option consiste à utiliser plusieurs fois les emballages plastiques. Les magasins bio, où la distribution en vrac et les systèmes de recharge se développent, sont peut-être les exemples de demain. Sachets de salade, boîtes de tomates cerises et sacs distribués en caisses sont à bannir car difficilement réutilisables et échappant facilement aux systèmes de collecte. Ces emballages sont d'ailleurs les principaux déchets retrouvés en mer sous forme de fragments.

L'Europe s'est fixé de réduire de moitié sa consommation de sacs plastique légers d'ici 2019 et de 80 % d'ici 2025 (par rapport à 2010). En France, les sacs à usage unique, autrefois donnés à tour de bras dans les supermarchés, sont interdits depuis juillet 2016. Suivront en 2020 le coton-tige et les vaisselles plastiques. Du Rwanda à la Chine, 25 pays ont taxé ou restreint l'usage de ces emballages dans le monde.

Plus récemment, des recherches ont mis en évidence l'impact des microbilles de plastiques. Ces polluants de moins de 5 millimètres ont été retrouvés dans des concombres de mer, des homards et des bernard-l'ermite vivant à des profondeurs allant jusqu'à 1 800 mètres. Les plastiques sont d'ores et déjà présents dans les coins les plus

Copyright © 2017 Editions Quae.

reculés des océans que sont les grands fonds marins. D'après l'estimation d'un groupe de scientifiques américains, l'équivalent d'au moins 300 cours de tennis couverts de microbilles est déversé chaque jour par les États-Unis dans l'océan. Des études ont mis en évidence le rôle des machines à laver. La dernière en date provient de l'université de Plymouth (Royaume-Uni) selon laquelle un cycle de machine à laver peut rejeter plus de 700 000 microfibres plastiques. Les tissus acryliques et les fibres polaires seraient particulièrement « friables ». Les cosmétiques et produits de nettoyages sont également pointés du doigt : une bouteille de shampoing peut contenir jusqu'à 100 000 microbilles en plastique. Le gouvernement britannique compte en interdire l'usage dans les produits de soin avant 2018, la France et les États-Unis pourraient également sévir.

Interdire, recycler, reste la possibilité de substituer. Créer de nouveaux matériaux à la fois biodégradables et ayant les formidables propriétés du plastique, résistant, façonnable, léger et peu cher, un défi audacieux forcé par la mise en quarantaine des plastiques. Aujourd'hui dérivé du pétrole, le plastique pourrait demain être fait de matière végétale. Une première génération de plastique à base de maïs, de blé ou de fécule de pomme de terre a vu le jour mais leur fabrication entre en compétition avec les cultures vivrières. Peu consommées en Occident et biodégradables, les algues pourraient être une bonne alternative.

En France, la société bretonne Algopack produit des plastiques moulés à base de macroalgues marines brunes depuis 6 ans. Les derniers verrous comme les problèmes liés à l'odeur ou à la couleur sautent progressivement. Et que dire de la *start-up* Swala qui vient de distribuer 30 000 exemplaires de sa bille hydratante, contenant 10 millilitres d'eau et constituée d'une membrane à base d'algue brune lors de la dernière *Grande Course du Grand Paris* 2017 ! Alternative

Copyright © 2017 Editions Quae.

aux bouteilles plastiques polluantes. L'une des limites au développement de ce marché demeure la disponibilité de la matière première : l'algue. En dehors de l'Asie où elles sont directement consommées, la culture d'algues n'est pas développée et se cantonne à un marché de niche à forte valeur ajoutée (produits cosmétiques, pharmaceutiques et agroalimentaires). Les algues cultivées coûtent trop cher pour finir en vulgaire morceau de plastique abandonné au coin des rues. La récolte en mer existe mais il y a toujours la crainte d'une irrégularité dans l'approvisionnement. Quant à récupérer les algues vertes échouées qui encombrent les plages, cela réclame une logistique et un cadre réglementaire encore inexistants.

Les producteurs de plastiques à base d'algues s'organisent pour récupérer la biomasse non utilisée par les groupes pharmaceutiques et cosmétiques. Toutefois, la qualité de ces sous-produits n'est pas toujours au rendez-vous : les traitements pour en extraire des molécules d'intérêts thérapeutiques ou cosmétiques peuvent détériorer leurs propriétés en tant que futur plastique. De plus, les quantités ne sont pas suffisantes pour envisager un marché de masse. Aujourd'hui, Algopack fabrique des montures de lunettes, des clés USB, des pots de fleur… selon des commandes précises et sur des quantités limitées. Pour élargir son marché et atteindre celui des emballages de grande distribution, Algopack envisage d'importer des sargasses, des algues qui envahissent les plages et ports de la Guadeloupe mais aussi de l'Afrique et des Caraïbes. Toute la difficulté est d'en maîtriser la chaîne de valorisation : « Si l'on récupère les algues échouées sur les plages, il faudra les nettoyer, si on les récupère au niveau des filets immergés qui protègent les plages touristiques, il faudra alors les sécher. Toutes ces transformations ont un coût énergétique qui ne rend pas toujours la solution compétitive avec les autres alternatives »,

Copyright © 2017 Editions Quae.

explique David Coti, président d'Algopack. « Prenez par exemple le coton-tige dont les bâtonnets devraient être interdits d'ici 2020. Pour l'instant, les grands groupes industriels envisagent de les remplacer par du bois ou du carton plutôt que par un plastique innovant et écologique mais coûteux. De même, si l'on interdit un jour les pots de yaourt, Danone fera peut-être le choix de les remplacer par des pots en verre. Il nous faut encore démontrer l'intérêt économique des plastiques d'algues. »

Responsable d'une équipe de recherche sur les microalgues au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Jean-François Sassi estime que le contexte actuel en Europe est propice à l'émergence d'un vrai marché : « Aujourd'hui, ce sont des sociétés issues de la plasturgie qui s'intéressent aux algues. Les acteurs ne sont plus les mêmes qu'il y a 10 ans et les projections économiques sont bien plus favorables. » Spécialiste du domaine depuis plus de 20 ans, il a notamment collaboré avec la société Eranova, une *start-up* qui projette de construire à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), son premier démonstrateur industriel de production de bioplastiques à base d'algue.

Autres candidates pour la fabrication des futurs plastiques biodégradables : les bactéries marines. Dans certaines conditions de stress, les bactéries produisent à l'intérieur de leurs cellules des granules de polyester. Avec moins d'azote, de phosphate, d'oligoéléments et autres nutriments essentiels à sa croissance, la bactérie se sent mise à la diète et fait donc ses « réserves » sous forme de petites billes de polyester. Les progrès réalisés dans l'extraction de ces granules pour en faire des plastiques ont permis de grandement réduire les coûts. Ainsi, le programme BluEcoPHA basé sur ce modèle devrait entrer en phase de pré-industrialisation en 2017. En Bretagne, les bactéries

Copyright © 2017 Editions Quae.

marines seront nourries avec les déchets agroalimentaires de l'usine Triballat spécialisée dans les produits à base de soja et de lait. Ce faisant, BluEcoPHA souhaite s'inscrire dans une économie circulaire où les déchets valorisés deviennent source de bénéfices. L'économie circulaire rompt avec le schéma traditionnel de production linéaire qui va directement de l'utilisation d'un produit à sa destruction. Cette façon de repenser le cycle de vie d'un objet, d'une matière ou d'une énergie s'inspire du fonctionnement des écosystèmes qui semblent répondre à la maxime du chimiste Antoine Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

> **Que faire ?**
>
> Pour connaître la teneur en microbilles de vos produits de consommation, rendez-vous sur www.beatthemicrobead.org

CHAMPS ET BÊTES AU RÉGIME DES ALGUES

C'est dimanche ! Le poulet rôti fumant embaume les tablées de France. Attention à ne pas mettre les informations, sans quoi, on risque de vous asséner que les poulets sont tous nourris avec des abats, qu'ils sont gavés d'antibiotiques et vivent entassés dans des cages sans jamais voir le soleil ni la terre… En menant l'enquête au sein de votre marché vous trouverez peut-être une perle rare, un éleveur soucieux des conditions de vie de ses volailles — il y en a. Sinon attendez quelques années, tout laisse penser qu'une approche raisonnée se généralisera. Cette mutation sera le fruit d'une lutte importante en Europe contre l'antibiorésistance. Vous avez peut-être un jour essuyé le refus de votre médecin généraliste de vous prescrire des antibiotiques. Il vous a alors expliqué que les microbes développaient des résistances à force d'être mis

Copyright © 2017 Editions Quae.

en contact avec des antibiotiques. Résultat : nous sommes en train de préparer pour nos enfants et petits-enfants une armée de microbes multi-résistants. La plupart des spécialistes, comme Antoine Andremont, chef du service de bactériologie à l'hôpital Bichat (Paris) et expert international dans le domaine de l'antibiorésistance, affirment que la réduction des antibiotiques dans la consommation humaine doit nécessairement s'accompagner de leur diminution massive chez les animaux d'élevage. Bien cuites, les bactéries ne résistent pas. Mais lorsqu'on apprête le poulet, les mains et les ustensiles de cuisine peuvent facilement être contaminés. Sauf pour les cuisiniers qui font de leur plan de travail un champ opératoire pour chirurgien. Si ce n'est par un contact direct, les animaux nous contaminent *via* leurs excréments qui atteignent les sols ou les eaux usées et retournent ainsi dans la chaîne alimentaire. D'après des études vétérinaires, un veau sur trois serait porteur d'une bactérie résistante sans être malade. En 2012, l'OMS (Organisation mondiale de la Santé) appelait à réagir. En France, le plan EcoAntibio a permis de réduire de 25 % l'usage des antibiotiques en médecine vétérinaire. Au Pays-Bas, où l'on rencontre la plus forte densité animale d'Europe, les quantités d'antibiotiques données dans les élevages ont été réduites de moitié et les bactéries résistantes semblent en nette diminution. Ainsi, il serait possible de limiter l'usage des médicaments sans mettre en péril l'économie des élevages.

Fin 2016, un symposium sur les alternatives aux antibiotiques organisé par l'OIE (Organisation mondiale de la santé animale) faisait état des différents moyens pour lutter efficacement contre les infections dans les fermes sans avoir recours aux antibiotiques. L'entreprise française Olmix, spécialisée dans la transformation des algues

Copyright © 2017 Editions Quae.

depuis 20 ans y présentait une étude scientifique menée avec l'unité Infectiologie et Santé publique de l'Inra Val-de-Loire (Institut national de recherche agronomique) sur les capacités anti-infectieuses d'une algue verte, *Ulva armoricana*. L'équipe a démontré *in vitro* qu'un composé de ces algues (un polysaccharide sulfaté) inhibait la croissance de bactéries pathogènes et stimulait la production de médiateurs pouvant agir favorablement sur l'immunité intestinale. Si l'intestin est le deuxième cerveau des humains, il est possible que ce soit le premier chez les bovins. On comprend que sa santé soit essentielle à l'équilibre global de l'animal, condition *sine qua non* pour lutter contre les agressions extérieures. Cette étude vient appuyer des publications antérieures qui mettaient en évidence chez les algues des propriétés antimicrobiennes similaires. Plusieurs entreprises comme Olmix ou encore Setalg ont déjà développé une gamme de produits à base d'extraits d'algues, servie comme compléments alimentaires aux animaux d'élevage. En 2015, plus de 500 000 poulets Saga (sans antibiotique grâce aux algues) issus d'un partenariat entre Olmix et une dizaine d'éleveurs de volailles étaient vendus sur les marchés français. Pour conserver des élevages productifs, la démarche est globale : outre la nutrition et la santé, le changement s'opère aussi en améliorant les conditions de vie des animaux. Plus d'espace, moins d'animaux, un entretien de la ferme au quotidien, entièrement revu de façon à ce qu'elle soit plus « saine ». Là aussi, les algues ont leur rôle à jouer. Par exemple, certains produits servent à assécher l'environnement de l'animal. En évoluant dans un cadre plus hygiénique, les bêtes sont moins exposées à la pression des virus et bactéries. Ce modèle rappelle étrangement la devise si difficile à respecter chez les hommes, « Mieux vaut prévenir que guérir ».

Copyright © 2017 Editions Quae.

Une devise qui pourrait concerner tout organisme vivant, y compris les plantes. Jusqu'à récemment, les Bretons épandaient des laisses de mer sur leurs champs. La forte teneur des algues en minéraux permet d'améliorer la composition des sols appauvris, leur richesse en colloïdes permet d'accroître la capacité de rétention d'eau des sols (maintien de l'humidité et de l'aération nécessaire à la mise en place du système racinaire). Ainsi, les algues ont pour double effet de fertiliser les terres arables tout en réduisant leur érosion. Les hormones qu'elles contiennent favorisent également la germination et la croissance des racines, tiges, feuilles ou fleurs. Ces connaissances empiriques ont été confirmées par des études scientifiques qui ont abouti à l'émergence d'un marché. Plusieurs procédés de fabrication existent pour produire des liquides concentrés (extraits bruts) à partir d'une grande diversité d'algues, majoritairement des algues brunes : *Laminaria* sp., *Ascophyllum* sp., *Ecklonia* sp., etc. En France, plusieurs entreprises dont Goëmar et Roullier distribuent des extraits de ce type. Encore plus étonnants, des travaux scientifiques ont permis de mettre au point des produits qui stimulent les défenses naturelles des plantes. Il ne s'agit plus d'améliorer la qualité du sol dans lequel la plante vit et puise ses nutriments. Il s'agit cette fois d'augmenter la capacité d'une plante à se défendre d'elle-même. Pionnière sur ce marché, la société Goëmar, basée à Saint-Malo, a inventé, en collaboration avec le CNRS, le premier « vaccin » pour les plantes. Contrairement au principe de la vaccination humaine, il ne s'agit pas d'inoculer à la plante un peu de mildiou (maladie de la vigne), de tavelure (champignons du pommier), de rouille (agresseur du blé) pour qu'elle apprenne à se défendre. Le vaccin n'est autre qu'un extrait des laminaires *Laminaria digitata* dont les molécules ressemblent aux champignons pathogènes.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Pulvérisé sur les jeunes pousses, ce traitement déclenche chez la plante des mécanismes de défense naturels. Lorsqu'un véritable parasite attaquera, la plante aura déjà affûté ses armes. Chaque plante développe son propre système de défense, ce qui occasionne une multitude de réponses à un ravageur. Cette diversité limite le développement de résistances auxquelles se heurtent les produits phytosanitaires classiques. Ces vaccins permettent aussi de diminuer la fréquence et l'importance des traitements curatifs à base de produits chimiques fongicides ou pesticides dont l'impact sur l'environnement n'est pas maîtrisé.

Il ne s'agit pas d'une potion magique mais tout de même, il y a une certaine magie à constater qu'un jus d'algue donne de belles salades !

La mer : 97 % de l'eau sur terre !

Souvenez-vous des tensions autour du manque d'eau potable en Israël, il y a une dizaine d'années. Le stress hydrique faisait craindre une « guerre de l'eau ». Une décennie plus tard, le pays est passé d'une situation de crise à un état de surproduction et revend désormais ses excédents aux voisins ! Un tour de force opéré grâce à la construction des plus grosses usines de dessalement d'eau de mer au monde : 70 % de l'eau consommée par les ménages proviennent de la Méditerranée.

À Tel-Aviv, un demi million de mètres cubes d'eau est pompé quotidiennement à un kilomètre du rivage et projeté sur une membrane poreuse qui retient les cristaux de sel. Ainsi dessalée, l'eau est rechargée en minéraux pour abreuver 1,5 million d'habitants. Appelée osmose inverse, cette technique de dessalement est la plus aboutie mais elle demeure coûteuse d'un point de vue économique et environnemental. Trouver une alternative moins énergivore est une priorité pour ce secteur voué à se développer. Près de la moitié de la population mondiale devrait être touchée par un stress hydrique élevé d'ici 2050. Déjà, le nombre d'unités de dessalement a doublé en cinq ans. Aujourd'hui, 17 000 usines à eau produisent 80 millions de mètres cubes par jour, soit l'équivalent d'un quart de la consommation française journalière. Tandis

Copyright © 2017 Editions Quae.

que la demande explose, les ingénieurs phosphorent : pour limiter l'usage d'énergie fossile, le solaire s'impose dans la *start-up* française Mascara-NT qui compte installer des démonstrateurs à Bora Bora (Polynésie française). Au prestigieux Massachusetts Institute of Technology (MIT), les chercheurs testent dans des villages indiens des petits démonstrateurs basés sur une technologie moins gourmande en énergie (l'électrodialyse).
Les rejets d'eau hyper-salés sont un autre problème majeur. Que faire de tout le sel extrait ? Pour l'heure, il est rendu à la mer ce qui conduit parfois à une stratification de l'eau qui ne circule plus. Cela limite l'oxygénation et étouffe le milieu. Autre effet négatif : l'eau devient comme un brouillard opaque au passage de la lumière, ce qui affaiblit les organismes photosynthétiques. Pour que l'eau ne nous laisse pas un goût amer, il faudra encore quelques travaux de recherche.

LA MER À TOUT FAIRE

Dès leur naissance, les humains génèrent un tas de déchets. À commencer par les trois milliards de couches-culottes jetables issues de la pétrochimie et de la chimie de synthèse. En Israël, la société Capitalnano travaille depuis 10 ans à l'élaboration d'une couche bio-sourcée et biodégradable fabriquée à partir de tissus de méduse. L'entreprise espère commercialiser son produit à partir de 2018. À Rennes, c'est la *start-up* Surfact'Green qui vient de se lancer dans les tensioactifs écologiques à base de coproduits de betteraves, de colza mais aussi d'algues. Ces substances sont couramment intégrées dans des crèmes de soin, des produits de nettoyage ménagers et industriels, des détergents, agents moussants, mouillants, dispersants… Courant 2017, Surfact'Green devrait vendre ses produits comme des alternatives aux tensioactifs de la pétrochimie. À Vern-sur-Seiche (Bretagne), les peintures de décoration à base d'algues fabriquées par AlgoPaint sont d'ores et déjà référencées chez Leroy Merlin et Mr. Bricolage. L'un des

Copyright © 2017 Editions Quae.

avantages affichés : cette peinture émet moins d'un gramme de composés organiques volatils (COV) par pot d'un litre quand l'écolabel européen fixe le seuil maximal à 30 grammes par litre. Or, ces COV seraient responsables de multiples affections de la peau, des poumons, du système nerveux et sont fortement soupçonnés de cancérogénicité. Lauréate du prix Innovation-Environnement du salon des maires en 2015, AlgoPaint compte maintenant développer une gamme pour les professionnels.

On assiste actuellement à la création de nombreuses entreprises utilisant les ressources marines comme matériaux ou principes actifs. Elles sont généralement l'aboutissement d'une dizaine d'années d'études, depuis la définition du concept et les premières preuves en laboratoire jusqu'au développement à l'échelle industrielle et commerciale. Aujourd'hui encore, une multitude de recherches visant à trouver des débouchés pour ces ressources continuent de mettre au point de nouvelles applications. Dans les laboratoires de l'Inserm à Bordeaux, l'équipe ChemBioMed (chimie des systèmes moléculaires et supramoléculaires à visée biomédicale) a découvert que le mucus des méduses avait la capacité de piéger les nanoparticules. Dans le réseau très dense de molécules que constitue ce mucus, les nanoparticules s'agrègent, précipitent et peuvent alors être récupérées afin d'être éliminées. Brevetée, cette découverte pourrait ouvrir la voie à la « dépollution » d'eaux fortement chargées en nanoparticules dont les impacts sur l'environnement et la santé demeurent incertains.

Plusieurs équipes tentent de concocter des peintures *antifouling* contenant des molécules d'origine marine. Ces peintures sont utilisées pour protéger la coque des navires ou les infrastructures en mer de la corrosion et de la fixation des organismes marins (*biofouling*). Les agents « antisalissures » et les vernis qu'elles contiennent sont très

Copyright © 2017 Editions Quae.

toxiques pour la faune et la flore marines. Or, plus de 200 composés marins, issus d'ascidies, d'éponges ou encore de l'algue *Fucus serratus,* présentent des propriétés *antifouling*. Certains envisagent de les incorporer dans les peintures. Par exemple, la némertilline, isolée du ver marin némerte, empêche la fixation des balanes, ces petits crustacés blanchâtres en forme de chapeau chinois qui s'accrochent sur les coquilles de moule. L'autre solution, serait de créer des « peintures vivantes », autrement dit, des biofilms constitués de bactéries marines. Appliquées sur des surfaces immergées, ces bactéries seraient sélectionnées pour défendre leur territoire contre l'invasion d'autres organismes. Autre exemple, le bryozoaire *Zoobotryon pellucidus* produit des substances inhibant l'adhésion des larves de balanes.

D'autres recherches concernent l'utilisation de la silice issue d'algues unicellulaires appelées diatomées. Au cours de son développement, la diatomée s'entoure d'un exosquelette de silice semblable à du verre. Au niveau mondial, 1,8 million de tonnes de diatomite issues de l'exploitation de carrières étaient produites en 2011 pour la fabrication de mortier, de filtres, de matériaux abrasifs ou absorbants, dans le secteur du bâtiment. Aujourd'hui, les ingénieurs s'inspirent des diatomées pour créer de nouveaux solides microporeux : la silice extraite de diatomée cultivée présente une surface utile 80 fois supérieure à la silice d'origine géologique. Maîtriser par génie génétique les processus qui permettent à ces organismes de fixer les minéraux et les métaux ouvre la voie à des composants électroniques de nouvelle génération. Des applications sont également envisagées dans le domaine des communications optiques, voire la fabrication de nanolaser. En effet, certaines diatomées ont la capacité de modifier la propagation des ondes électromagnétiques telle que la lumière.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Dans le secteur de la chimie, la liste des applications possibles et en cours d'étude pour les ressources marines est longue. Il faut toutefois distinguer les applications pour un marché à forte valeur ajoutée (peinture, électronique, médicaments, compléments alimentaires...), de celles destinées à un marché de masse comme l'optimisation de l'exploitation pétrolière grâce à des bactéries marines, la bioremédiation de sites pollués grâce à des microalgues, ou encore la production d'algocarburant. Les applications ayant pour seul débouché un marché de masse supportent difficilement les coûts engagés pour cultiver une ressource marine à l'échelle industrielle. C'est le constat amer fait par plusieurs entreprises lancées en fanfare dans l'algocarburant alors que les prix du baril de pétrole dégringolaient quelques années plus tard. Pourtant, le potentiel marin est là. Ainsi, l'une des approches suivies notamment au Gepea (le laboratoire de Génie des procédés environnement et agroalimentaire de Saint-Nazaire) consiste désormais à trouver la souche idéale pouvant répondre à un maximum d'applications possibles. Elle permettrait d'obtenir, par exemple, une fraction liquide contenant des molécules d'intérêts (pigments, sucres, protéines...) pour l'industrie cosmétique et pharmaceutique, une fraction huileuse (lipide) valorisable en carburant, des débris cellulaires (biomasse) pouvant servir à la production de biogaz. Avec ces trois applications, voire plus, la microalgue deviendrait rentable à terme pour une valorisation énergétique. L'autre option est de sélectionner génétiquement des souches présentant des teneurs très supérieures à celles disponibles dans le milieu naturel. Les équipes du Centre Ifremer Atlantique ont ainsi sélectionné une souche présentant des teneurs en corps gras trois fois supérieures à l'espèce du milieu naturel. En laboratoire ou dans le milieu naturel, seront sélectionnées uniquement les souches capables à la

Copyright © 2017 Editions Quae.

fois d'être productives et de maintenir leurs propriétés au cours des différentes étapes, de la culture à la séparation, en passant par la récolte et la fragmentation. Ces perles, les laboratoires les cherchent indifféremment parmi les microalgues marines et d'eau douce. Dans le second cas, les microalgues ont l'avantage d'être facilement cultivables et transformables (moins de corrosion). Dans tous les cas, elles ont un potentiel énorme avec une biodiversité de plus d'un million d'espèces estimées dont 30 000 identifiées mais non testées !

Les chercheurs, plein d'espoir et dotés d'un esprit de découverte, restent persuadés que les microalgues marines ont de l'avenir. Les industriels semblent pour l'instant davantage rassurés par les souches d'eau douce qui sont cultivées dans un milieu maîtrisé. Elles ont aussi l'avantage de facilement s'intégrer dans un système de bioéconomie circulaire où les coproduits reprennent de la valeur dans un deuxième usage et où les déchets (CO_2, effluents liquides) deviennent de nouveaux intrants pour la production. Par exemple, le groupe Suez, spécialisé dans le traitement des eaux usées, souhaite s'attaquer, avec la société girondine Fermentalg, au défi du XXIe siècle : la purification de l'air. Ils ont imaginé dépolluer les villes de France en plaçant des « puits » de carbone en zone urbaine, dans les colonnes *Morris* qui servent actuellement à l'affichage publicitaire. Remplie de microalgues, chaque colonne peut capter une tonne de CO_2 par an, soit l'équivalent d'une centaine d'arbres. Les algues pompent dans l'atmosphère le CO_2 dont elles ne conservent que le carbone pour leur croissance et relâchent l'oxygène. À Paris, une première colonne sera testée courant 2017. Dans l'idéal, les microalgues produites seront ensuite transportées vers une station d'épuration où elles continueront à avaler les polluants des eaux usées. Cette technique est déjà large-

Copyright © 2017 Editions Quae.

ment utilisée dans le cadre du lagunage à végétaux, une technique de base pour réduire l'impact sur l'environnement d'eaux chargées en azote et en phosphore. Pour terminer, les microalgues seront placées dans un méthaniseur qui les transformera en biogaz afin d'alimenter les bâtiments en énergie propre. Il faut maintenant confronter ce schéma aux conditions de terrain. Pour l'instant, aucune microalgue marine ne pourrait servir pour l'assainissement des stations d'épuration qui fonctionnent avec de l'eau douce. Autre projet en cours, celui d'isoler thermiquement des bâtiments avec des murs constitués d'une lame d'eau où croissent des microalgues exposées à la lumière solaire. Un pilote fonctionne au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) de Champs-sur-Marne (77) et un immeuble parisien paré d'une façade d'algues devrait voir le jour dans le 13e arrondissement sous l'élan du consortium SymBIO2. L'intérêt de ces biofaçades est de réduire de moitié la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation, de consommer du CO_2 et de produire de l'oxygène et des matières valorisables en aquaculture comme l'astaxanthine, un colorant issu de la microalgue d'eau douce *Haematococcus pluvialis*.

Ces exemples ne sont que la partie émergée de l'iceberg. Des dizaines de scientifiques continuent dans les laboratoires à chercher la microalgue miracle. Aujourd'hui, l'une des limites au développement des microalgues d'eau douce est la difficulté à bien recycler l'eau afin de pouvoir la réintégrer dans un circuit de consommation. L'eau douce venant à se raréfier (*voir « La mer dans nos assiettes »*), il semble compliqué de déployer un vaste marché basé sur ce milieu. Avec les microalgues marines, il sera tout aussi nécessaire de traiter l'eau avant de la rejeter mais au moins, nous ne manquons pas d'eau de mer !

Copyright © 2017 Editions Quae.

3

LA MER DANS NOS ASSIETTES

D'ici 2050, nous aurons 2 milliards de bouches à nourrir en plus. Qu'aurons-nous fait de la formidable réserve alimentaire qu'est l'océan ? Parviendrons-nous à faire meilleur usage de ce réfrigérateur dont certaines ressources sont déjà surexploitées ?

Côté pêche, la population mondiale est scindée en deux. D'une part, les pays développés qui ont limité la pression sur leurs territoires maritimes alors que la consommation augmentait, d'autre part, les pays émergents où la surpêche continue d'augmenter pour répondre à la demande croissante des premiers… Dans notre situation de libre échange capitaliste, seul le choix du consommateur peut infléchir cette tendance.

Les progrès de l'aquaculture ont permis de remplir un étage entier de notre futur réfrigérateur. La production dépasse parfois celle des poissons pêchés, mais les impacts environnementaux de cette industrie peuvent limiter les perspectives. Tandis que des chercheurs tentent de trouver des solutions pérennes à proximité du littoral, voire sur le continent en circuit fermé, des groupes industriels proposent d'éloigner les bassins aquacoles au large où la puissance des courants pourrait disperser les rejets générés par l'élevage.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Nourrir l'humanité avec des algues ? C'est le scénario futuriste le plus radical. Nos assiettes seraient composées de salades d'algues, de soupes de méduses, le tout accompagné d'une huile de poisson-lion. Des aliments fonctionnels voués à nous apporter les nutriments essentiels tout en préservant la planète. Avec l'ingéniosité des Grands chefs, aucune raison de ne pas conserver en plus, le goût des plats qui font plaisir. Bon appétit !

PÊCHE DURABLE OU CONSOMMATEUR RAISONNABLE ?

Avez-vous la moindre idée de la quantité de poissons, crustacés et produits de la mer que vous mangez chaque année ? 7,6 kilos ? Non, ce chiffre correspond aux pays à faible revenu ; 18,8 kilos ? Non, celui-ci correspond aux pays en développement ; 26,5 kilos ? Toujours pas, c'est la moyenne d'un consommateur de pays industrialisé. Pour un Français, cette moyenne est de 34 kilos par an dont 70 % proviennent de captures en mer. « Pour tendre vers une pêche durable, il faudrait réduire par trois votre consommation de poisson sauvage », avertit Didier Gascuel, directeur du Pôle halieutique à Agrocampus Ouest.

Lorsqu'ils discutent de l'état des ressources halieutiques, les spécialistes ne parlent pas des poissons, ni même d'espèce mais de la population d'une espèce dans une zone géographique définie, c'est le stock de poisson. Actuellement, 60 % des stocks de poissons sont pêchés à leur maximum et 30 % sont surexploités. Certaines zones sont particulièrement affectées comme la Méditerranée et la mer Noire où plus de 90 % des stocks (merlu, rouget barbet de vase, turbot, sole…) sont surexploités. D'année en année, à l'échelle mondiale, la situation se détériore.

À ce rythme, la majorité des stocks sera surexploitée en 2050. Déjà la surexploitation des ressources halieutiques

Copyright © 2017 Editions Quae.

a provoqué l'effondrement de certaines pêcheries. C'est le cas de la morue du Canada, du hareng islandais, ou des ormeaux du Nord-Est Pacifique. D'un côté les pêcheries ferment, de l'autre, les stocks diminuent au point que les espèces de poissons concernées ne jouent plus qu'un rôle limité dans l'écosystème. Pour certaines espèces fragiles, comme les mammifères marins ou certains requins, des extinctions locales et régionales ont même été observées. C'est par exemple le cas de la baleine grise en Atlantique. Le triste récit du carnage des baleines par J.M.G. Le Clézio dans *Pawana*, préfigure le pire : « Le siècle nouveau commence, plus rien ne sera comme avant. Le monde ne retournera plus à son origine. La lagune n'est plus le lieu où la vie pouvait naître. Elle est devenue un lac mortel, le lac lourd et âcre du sang répandu. Jour après jour, les chasseurs ont remonté le chenal, pour tuer les baleines dans la lagune. Année après année, ils sont venus avec des navires de plus en plus grands, de toutes les parties du monde, de Californie, du Chili, d'Argentine, d'Alaska, de Norvège, de Russie, du Japon. Les navires faisaient comme une armée à l'entrée de la lagune. Ils portaient des harpons empoisonnés au curare, des canons lance-torpilles, des harpons électriques, des palans, des chaînes, des crocs. […] Comment peut-on oublier pour que le monde recommence ? » se lamente le commandant Charles Melville Scammon. Aujourd'hui, chasser la baleine est interdit mais une centaine d'espèces marines sont inscrites sur la liste des espèces vulnérables ou en danger d'extinction de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) : les thons rouges du Sud, le haddock du Nord, la morue de l'Atlantique, l'anguille du Japon… Toutefois, les connaissances éparses et fragmentaires de la biodiversité marine ne permettent pas d'être catégorique. Il n'est pas rare qu'une espèce

Copyright © 2017 Editions Quae.

considérée éteinte réapparaisse à la faveur d'une campagne océanographique, on la qualifie alors d'espèce Lazare en référence au personnage de Lazare ressuscité par Jésus selon le Nouveau Testament. Par exemple, la raie de grande taille (*Dipturus leavis*) que l'on croyait disparue depuis 1998 a été observée occasionnellement dans des zones refuges. Une récente étude affirme que seulement quinze espèces marines auraient disparu depuis 500 ans. La crainte n'est donc pas l'extinction des espèces, au-delà de quelques-unes emblématiques, mais la défaunation, c'est-à-dire la diminution du nombre d'animaux qui perturberait durablement les écosystèmes concernés. En 2009, des Américains rapportaient un déclin de 89 % des grands animaux marins par rapport à leur niveau initial. Une amélioration récente modère ce taux à 84 %.

La défaunation à l'ère de l'Anthropocène

En se focalisant sur les potentielles extinctions, on occulte souvent une autre réalité : la défaunation. Il s'agit d'une situation où l'ensemble de l'écosystème est mis en danger par la diminution massive et généralisée d'un grand nombre d'espèces ou la disparition d'une espèce « clé de voûte » essentielle au bien être des autres. On cite souvent l'exemple de l'abeille qui, en tant que pollinisateur, a des fonctions incontournables pour que l'écosystème subsiste. Moins connue, la loutre de mer est fondamentale pour l'entretien des forêts d'algues géantes et la vie qui en dépend. En revanche, dans un écosystème à forte biodiversité, plusieurs espèces peuvent assurer des fonctions écologiques similaires, ce qui lui donne un avantage face aux pressions externes.

En mer, la plupart des animaux menacés (requins, baleines, poissons de grande taille...) sont au sommet de la chaîne alimentaire et assurent de ce fait le transfert des nutriments d'un milieu à l'autre. Dans les années 1990, la surpêche de la morue au Canada a provoqué sa raréfaction. Ses proies, telles que les crabes, les crevettes et les oursins, se sont multipliées. Le zooplancton, dont

Copyright © 2017 Editions Quae.

> les proies se nourrissaient, s'est effondré laissant place libre au phytoplancton qui a proliféré. À son tour, le phytoplancton a induit une baisse des nitrates et ainsi de suite. Toute la chaîne alimentaire s'en est trouvée modifiée.
> Une protection intégrée de la biodiversité consisterait à prendre en compte non seulement les espèces directement menacées par les activités humaines, mais aussi, les effets en cascade de leur disparition sur les autres espèces. Par exemple, une étude publiée dans *Science* en 2011, démontrait qu'il fallait conserver au moins un tiers de la biomasse historique des poissons pour que les populations d'oiseaux marins qui en dépendent ne soient pas affectées. Demain, les quotas de pêche pourraient se baser à la fois sur l'état du stock de poissons et sur des données concernant les autres espèces du milieu marin.

Face à cette surexploitation, dont le constat ne date pas d'hier, certains États ont réagi. Le succès, le plus récent et le plus emblématique des politiques de gestion de pêche, est celui de la reconstitution des populations de thon rouge en Méditerranée. L'effondrement des stocks de *Thunnus thynnus* a été largement médiatisé en 2010 alors que les environnementalistes faisaient front, unis pour tirer la sonnette d'alarme. Suivant les recommandations des scientifiques, la Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique (ICCAT) a diminué de moitié les quotas de pêche pendant que les États ont renforcé leurs moyens de contrôle. Une stabilisation de la situation a été observée dès 2012 et les recommandations maintenues. Rendu plus rare sur le marché, le thon rouge se vendait plus cher et les pêcheurs compensaient partiellement la diminution des volumes pêchés. En 2014, la courbe continuait de se redresser et les quotas ont été augmentés de 20 %. Aujourd'hui, l'envie de remonter encore les quotas pour cette pêche si lucrative se fait sentir… Les scientifiques recommandent, quant à eux, une augmentation graduelle et modérée car il y a encore

Copyright © 2017 Editions Quae.

beaucoup d'incertitude sur cette espèce dont on vient de découvrir qu'il existait des sous-populations résidantes en Méditerranée alors qu'on la pensait migratrice. Outre le retour du thon en Méditerranée, les retombées des mesures engagées dans les différents pays sont énumérées dans le dernier rapport de la FAO : en Europe, l'instauration de quotas se traduit aujourd'hui par une baisse du taux de pêche et une augmentation de l'abondance de 70 % des stocks dans l'Atlantique Nord-Est. Aux États-Unis, la loi pour une pêche durable (*Sustainable Fisheries Act,* 1996) a contribué à ce que 64 % des 44 stocks surexploités se reconstituent ou soient en bonne voie de l'être. Au Pérou, les senneurs constituaient la plus grande flottille au monde consacrée à une seule espèce, l'anchois. Sa capacité était trois fois trop importante pour une exploitation optimale. L'attribution de quota individuel a permis de réduire la surcapacité de la flottille en mettant au rebut un quart des navires consacrés à l'anchois (300 bateaux). Dans l'océan Pacifique occidental et central, les pêcheries fournissent la moitié des thons vendus dans le monde. L'espèce étant migratrice, les pays insulaires ont mis en place un dispositif pour gérer de concert une pêche durable : en 2010, un total admissible de capture (TAC) compatible avec la pérennité des ressources a été réparti en « jours de pêche » entre les différents États.

Certains experts remettent en cause la fiabilité de ces informations recueillies auprès des pêcheurs eux-mêmes, dans les zones portuaires n'ayant pas toujours de contrôle strict et où les statistiques fournies ne recouvrent pas toujours les mêmes données : par exemple, certains pays affichent les tonnages de poissons pêchés (produit entier et frais) tandis que d'autres mélangent produits frais, secs ou fumés, vidés ou étêtés. C'est pourquoi, il peut être intéressant de compléter ces statistiques avec des données

Copyright © 2017 Editions Quae.

à plus petite échelle où les informations sont davantage contrôlées et les biais moins nombreux. Par exemple, dans les aires marines protégées qui sont en quelque sorte des laboratoires à ciel ouvert pour l'observation des effets d'une restriction des pêches. En Méditerranée, une étude réalisée par le Pôle halieutique d'Agrocampus Ouest (l'Institut agronomique de Rennes), montre qu'à l'intérieur des zones protégées, les effectifs de mérou brun se sont multipliés par 10, voire 15 en 25 ans ! À l'extérieur, ils augmentent aussi grâce à un moratoire les protégeant depuis 1993 mais dans des proportions de 2 à 3. Dans la réserve naturelle de Bouches de Bonifacio, créée en 1999 au sud de la Corse, la biomasse de poisson est en moyenne six fois supérieure dans les zones de non prélèvement par rapport aux zones laissées en libre exploitation : elle a doublé en 2 ans, quadruplé en 10 ans et s'est multipliée par six en 20 ans.

Que peut-on conclure de ces résultats ? Tout d'abord, qu'il est possible de reconstituer un stock de poissons ou une biomasse décimés. Ce n'est pas systématique mais cette possibilité est porteuse d'espoirs. Encore faut-il par la suite qu'une volonté politique maintienne les conditions nécessaires à cet équilibre et que d'autres facteurs environnementaux comme le changement climatique n'anéantissent pas tous les efforts.

Autre information, les terriens se préoccupent de plus en plus de l'état de la mer. Certains spécialistes parlent même d'un mouvement de fond qui aurait pris racine dans la ratification de la Convention des Nations unies de Montego Bay sur le droit de la mer (1982). Dernier exemple en date de ce tournant dans la gestion des pêches : l'interdiction faite par l'Union européenne de pêcher à plus de 800 mètres de profondeur. Depuis 2017, grenadiers, empereurs, lingues bleues, sabres noirs et requins peuvent circuler dans les eaux européennes sans

Copyright © 2017 Editions Quae.

crainte d'être pris dans les filets des pêcheurs. Auparavant, la pratique consistait à draguer les fonds avec de larges filets qui brisaient tout sur leur passage (coraux froids et habitats sédimentaires) et rendaient l'eau turbide. Cette méthode de chalutage se pratique encore le long des côtes où elle prélève toutes sortes de spécimens, y compris ceux interdits à la pêche, comme la tortue ou le requin pèlerin. Le chalutage, non sélectif, ratisse également des poissons trop petits, trop gros, trop abîmés, sans valeur commerciale ou hors quotas pour être vendus au port. Ces prises sont donc rejetées par-dessus bord en pleine mer mais une bonne partie ne survit pas au coup de filet. Dans son ouvrage *Une mer sans poissons*, Philippe Cury, directeur de recherches à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), rapporte : « On estime que 38 % des tortues prises dans les chaluts à crevettes périront de toute manière », qu'elles soient ou non remises à la mer.

L'Europe a voulu s'attaquer au problème en imposant à tous les pêcheurs de ramener l'intégralité de leur capture au port. D'ici 2019, les poissons seront débarqués et comptés de façon à dresser un panorama complet de la situation. Aujourd'hui, les statistiques prennent mal en compte ces rejets qui sont probablement sous-déclarés. Au moins un quart des captures serait rejeté en Europe. Cette incertitude limite considérablement la pertinence des estimations de quantités de poissons pêchés : « Le chiffre officiel des prises ne bouge plus depuis 20 ans, autour de 80 millions de tonnes. La sous-déclaration a-t-elle tendance à augmenter, ce qui voudrait dire que les océans ont finalement produit beaucoup plus de poissons que ce qu'on imaginait ? A-t-elle au contraire tendance à diminuer, signe que le déclin est vraiment et fortement amorcé depuis les années 1990 ? », s'interroge Bruno Parmentier, consultant en matière d'agriculture et d'alimentation dans le monde

Copyright © 2017 Editions Quae.

et auteur de nombreux ouvrages. Avec cette nouvelle mesure, l'Union européenne espère inciter les marins-pêcheurs à limiter les prises non autorisées en s'armant d'engins plus sélectifs, en décalant les horaires et zones de pêche ou en améliorant ou en changeant de méthode de capture. Toutefois, les difficultés pour mettre en œuvre cette réglementation la rendent pour l'heure peu contraignante. Quel mode de surveillance mettre en place ? Que faire des poissons hors gabarit s'ils sont interdits à la vente pour la consommation humaine ? Comment éviter l'instauration d'un marché parallèle ? Laissées en suspens, ces questions pourraient limiter la portée de la réglementation… à moins que les pêcheurs soient davantage sensibilisés et s'engagent d'eux-mêmes dans des pratiques plus respectueuses des spécimens non commercialisables. « Il n'y a pas si longtemps, il y avait dans la formation des marins-pêcheurs, 300 heures sur la carburation des moteurs et seulement 10 heures sur la gestion environnementale des pêcheries », regrette Didier Gascuel. « D'après moi, pour que la pêche change de visage, il faudrait un profond changement culturel chez les pêcheurs eux-mêmes et pas seulement dans les instances européennes. » Il faudra aussi certainement un changement chez les consommateurs.

Ce changement culturel n'atteindra certainement pas les pilleurs de la mer. Du petit bateau réalisant des rapines à la hâte dans des conditions précaires jusqu'au gros navire sillonnant les mers depuis plusieurs années, le bestiaire des navires-braconniers est très bigarré mais leur bilan reste lourd. Les prises illégales pèseraient pour au moins 15 % dans les volumes de poissons capturés dans les océans. En 2014, une image satellitaire montrant de nuit une myriade de points lumineux dans la baie du Bengale, à l'Ouest de l'Indonésie, a fait le tour des magazines de pêche. Ces halos

Copyright © 2017 Editions Quae.

étaient des « navires fantômes » selon la formule consacrée aux bateaux en pêche illégale. L'archipel de Java affirme qu'au moins 5 400 navires s'approvisionnent illégalement sur son territoire maritime chaque jour. Changeant régulièrement de nom, de pavillon et profitant des zones d'ombre de l'océan austral où la surveillance est compliquée, le *Viking* est l'un des plus célèbres braconniers. Il a parcouru les mers pendant dix ans malgré la traque dont il faisait l'objet : recherché par Interpol pour infraction en matière de pêche et par l'association Sea Shepherd pour le braconnage de la légine, un poisson carnassier vivant en Antarctique, il a finalement été arrêté par les autorités indonésiennes en 2016. C'était mal tombé car ce pays n'emploie pas la méthode douce avec les pirates : le *Viking* a été explosé en pleine mer. Il rejoignait ainsi les centaines de navires braconniers gisant au fond de la baie du Bengale sous les coups de la dynamite. Le spectacle s'est déroulé à quelques kilomètres des îles de façon à ce que les caméras relaient abondamment les surprenantes images. À 180° de l'autre côté du globe, couler ou abandonner un navire en pleine mer semble incongru, voire répréhensible. En Indonésie, deuxième producteur mondial de poissons après la Chine, on applaudit des deux mains puisqu'il s'agit de bandits qui pillent l'équivalent de plusieurs milliards de dollars, selon le gouvernement. En France et aux États-Unis, la pêche pèse moins économiquement que l'industrie de la coiffure ; en Angleterre, elle représente moins que le secteur des tondeuses à gazon. En Asie, il s'agit non seulement d'un moyen de survie pour des pêcheries artisanales mais aussi d'un pilier de l'économie pour beaucoup de pays. Cette région du monde concentre plus de 80 % des pêcheurs voguant sur l'océan. Entré en vigueur en 2016, le premier traité international mis au point par la FAO et destiné à lutter contre la pêche illégale, non déclarée et non

Copyright © 2017 Editions Quae.

réglementée (INN), permettra peut-être de limiter les pertes pour ces pays et les explosions intempestives de navires.

Préserver la ressource halieutique n'est donc pas seulement un combat écologique, c'est une nécessité économique pour beaucoup de pays en développement et un impératif vital pour un certain nombre d'humains : au Bangladesh, au Cambodge, au Ghana, en Indonésie, en Sierra Leone et au Sri Lanka, 50 % des apports en protéines animales proviennent du poisson. En 2014, les exportations des produits de la pêche des pays en développement ont rapporté 80 milliards de dollars (captures et élevages) générant des revenus commerciaux nets plus élevés que ceux liés à la viande, au tabac, au riz et au sucre, tous réunis ! Et pourtant, une récente étude de la Banque mondiale titrait « Des milliards de dollars engloutis » en rapportant le manque de performance économique des pêcheries dans le monde. Le secteur de la pêche pourrait gagner jusqu'à 83 milliards de dollars en réduisant la pression exercée sur les océans (à titre de comparaison, ce secteur générait en France 1,1 milliard d'euros en 2013). La solution consiste à réduire l'activité de pêche de façon à reconstituer les stocks de poissons et ainsi, accroître le poids, la valeur et le prix des prises. En somme, réduire les prises aurait du sens d'un point de vue environnemental mais aussi économique ! Le rapport s'appuie notamment sur différentes expériences comme celle des pays insulaires du Pacifique qui ont opté avec succès pour une gestion régionale encadrée de la pêche aux thons. Cinq ans après la mise en place de ce dispositif, les recettes réalisées par les pêcheries thonières se sont multipliées par six pour atteindre 350 millions de dollars. Tous ces exemples nous montrent que des solutions existent : limiter la pêche par des quotas, réduire les prises illégales, les rejets inutiles, changer de techniques en limitant par exemple les dispo-

Copyright © 2017 Editions Quae.

sitifs de concentration de poissons (DCP), qui par le truchement de radeaux géants attirent les poissons. Quelle que soit la nature des mesures, toutes ont pour but de réduire les captures.

D'un côté, la Banque mondiale incite à « pêcher moins et mieux », de l'autre, des associations et des scientifiques invitent à « manger moins et mieux ». Tandis qu'une bonne partie des pêcheurs et instances politiques occidentales faisaient du chemin, les consommateurs augmentaient leurs rations, notamment en suivant les conseils des nutritionnistes ! Résultat : nos eaux territoriales sont surveillées et davantage protégées mais la pression de pêche est transférée en Asie et en Afrique. C'est maintenant aux consommateurs de faire en sorte que l'assiette du pêcheur ne soit plus un repas quotidien. L'objectif : diviser par trois nos portions de poissons tout en tenant compte de l'état des stocks. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur des initiatives comme *Mr. Goodfish* et MSC. Ces labels garantissent une pêche légale, réalisée à la bonne période, sur des stocks non fragilisés.

> **Que faire ?**
>
> Le programme *Mr. Goodfish* (www.mrgoodfish.com), initié par 3 aquariums européens et soutenu par l'UICN, liste à chaque saison les espèces dont les stocks ne sont pas en danger et qu'il est possible de consommer.

L'AQUACULTURE : PLANCHE DE SALUT OU RADEAU DE LA MÉDUSE ?

Si l'on prolonge les courbes enregistrées depuis les années 1960, il n'y a pas de place au doute : en 50 ans, la consommation mondiale de poisson a quadruplé. En mer, 90 % des stocks de poissons sont pêchés jusqu'à leur limite,

Copyright © 2017 Editions Quae.

souffrent de surpêche ou sont déjà épuisés. Impossible donc de tirer davantage de la mer. Pour continuer à bénéficier des protéines animales qu'offrent les océans sans les vider, pourquoi ne pas « élever » les poissons comme nous élevons les bœufs, les moutons ou les poulets ? D'ailleurs, la pisciculture moderne, apparue à la fin dans les années 1970, a eu un tel succès qu'elle produit aujourd'hui autant que les captures en mer, soit 80 millions de tonnes annuellement. Demain, ne consommer que des poissons élevés pourrait s'inscrire dans la suite logique de l'Histoire. Heureusement, l'histoire humaine n'a rien de linéaire et se réécrit au fil des découvertes, prises de conscience et limites que nous impose la nature. Le système industriel de production de viande a largement été critiqué, notamment après le scandale de la vache folle ou celui des raviolis au cheval. Mais si l'on met de côté ces dérives qu'on espère ponctuelles, il y a en toile de fond dans l'élevage, l'impact silencieux des pollutions atmosphériques, de l'usage excessif d'antibiotiques, du traitement parfois inacceptable des animaux. Produire massivement des salades réclame des pesticides mais élever des porcs de manière intensive est autrement plus problématique d'un point de vue éthique. Qu'en est-il pour le poisson ? Alors que la moitié des assiettes du pêcheur consommées sur la planète sont le résultat d'élevage en cage, les critiques sont de plus en plus nombreuses. À commencer par la nourriture fournie aux poissons d'aquaculture.

En France, le saumon est roi, viennent ensuite le bar, la truite, la daurade, le cabillaud. Ces animaux sont tous carnivores. En pleine mer, ils se nourrissent d'invertébrés comme des vers et d'une gamme variée de poissons. En bassin d'élevage, les carnivores sont nourris de poisson sauvage. Un quart des poissons pêchés à l'échelle mondiale sont transformés en farine ou en huile pour les

Copyright © 2017 Editions Quae.

animaux d'élevage : un énorme marché s'est développé au Pérou autour de l'anchois, mais cette pêche concerne aussi le chinchard et la sardine au Chili, le menhaden écailleux du golfe du Mexique et, à l'échelle européenne, les lançons, le sprat, le capelan, le tacaud norvégien, le merlan bleu et le hareng. En moyenne, il faut 2 kilos de poissons pélagiques pour fournir 1 kilo de « chair » d'élevage. Les bassins d'aquaculture les plus performants ont permis de diminuer ce ratio en ajoutant des farines et des huiles végétales. Avec la diminution des stocks de poissons en mer, les farines coûtent trois fois plus chères qu'il y a dix ans ; les remplacer par des végétaux est un gain économique mais pour quel impact écologique ? Les farines végétales sont faites avec du colza, du tournesol et des légumineuses mais beaucoup sont des tourteaux de soja dont une partie est importée du Brésil, d'Argentine ou des États-Unis. Souvent, leurs cultures entrent en compétition avec celles des cultures moins industrielles et plus diversifiées destinées à la consommation humaine locale. Parfois, elles résultent de la déforestation de ce qu'on estimait autrefois « le poumon de la Terre ». Quant aux pesticides utilisés abondamment dans ces cultures industrielles, on les retrouve en bout de chaîne dans la chair des poissons d'élevage. En Europe, la réglementation limite les quantités de pesticides tolérées mais ailleurs, qu'en est-il ?

Enferré dans des logiques industrielles, productivistes et souvent polluantes, le secteur de l'agriculture n'est peut-être pas la meilleure alternative aux farines de poissons pour 2050. Elle occupe pourtant une place maîtresse en 2017. Passons en revue les autres options pour nourrir ces poissons. Le sang, les graisses, les viscères de porcs et de volailles pourraient servir de source nutritive mais les consommateurs européens, hantés par l'affaire de la

Copyright © 2017 Editions Quae.

vache folle, refusent cette option qui ne s'est donc pas répandue. Cela ne les empêche pas de continuer à manger des crevettes importées dont la traçabilité des repas est plutôt opaque. L'option qui semble convenir à tous : nourrir les élevages avec nos restes de poissons. Une fois le repas terminé, au moins la moitié de l'animal est toujours dans l'assiette : arrêtes, tête, peau, viscères, queues, nageoires, œufs… appelés dans le jargon des spécialistes coproduits et sous-produits halieutiques. Ces « rebuts » servent à fabriquer un tiers des farines de poissons vendues en Europe. Ils sont récupérés dans les usines de transformation — mareyages, conserveries, saurisseries et industries de l'agroalimentaire — où le poisson devient filet sous sachet. Avec des acteurs aux pratiques très variées, situés dans des zones géographiques éloignées les unes des autres, ce marché manque encore de coordination. Il s'inscrit toutefois dans une tendance en plein essor : la lutte contre le gaspillage et le recyclage des matières. D'ailleurs, les spécialistes s'intéressent également aux coproduits des filières biocarburant, production de bière, de gomme, amidonnerie, etc. qui possèdent eux aussi un intérêt nutritionnel et une disponibilité régulière. Le recyclage des coproduits pourrait compléter les ressources tirées des projets les plus futuristes.

Des recherches très séduisantes se tournent désormais vers un mélange d'huiles à base de microalgues — dont on vante partout la richesse en oméga 3 — avec des farines à base d'insectes. Après tout, un chat reste un chat et un poisson carnivore ne deviendra pas herbivore… à moins que des manipulations génétiques ne s'en mêlent. La FAO a identifié plusieurs espèces d'insectes ayant un fort potentiel nutritif et pouvant être produit à grande échelle : les larves de la mouche soldat noire (*Hermetia illucens*), de la mouche domestique commune (*Musca*

Copyright © 2017 Editions Quae.

domestica) et du ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*), mais d'autres espèces comme le ver à soie et le criquet semblent intéressantes. En Asie, ils sont couramment utilisés dans l'alimentation des poissons d'élevage. En Europe, des *start-up* avant-gardistes comme Ynsect ont déjà leurs clients dans le domaine de l'alimentation pour les animaux domestiques. Cette jeune société française, incubée dans le Génopole d'Évry, a conçu une technologie pour élever et transformer des larves de ténébrion meunier en farine animale. La construction d'une unité de production en 2018 vise précisément le marché de l'aquaculture qui requiert d'importants volumes de protéines. Aux États-Unis, Enviroflight vient de mettre sur le marché une farine à base de blé et de larve d'hermétie brillante, une mouche originaire d'Amérique du Sud. Les crevettes qui s'en nourrissent sont plus pâles que d'habitude mais seraient tout aussi goûteuses que leurs congénères. En assurant une production locale, les pays ne seraient plus tributaires des marchés mondiaux de l'alimentation et limiteraient les coûts du transport. Point fort des larves et des insectes, ils se nourrissent de déchets alimentaires et sont des recycleurs bon marché occupant peu d'espace. Les écologistes leur mettront certainement une bonne note.

Avec ces futures farines et huiles « durables », l'aquaculture remonte sa cote mais pas assez pour prétendre à la faveur des écologistes car pour éviter des épidémies, les animaux sont parfois biberonnés aux antibiotiques. C'est toujours le cas au Chili, deuxième producteur mondial de saumon. Le premier producteur, la Norvège, a abandonné les antibiotiques au profit des vaccins. Les évadés, que l'on suppose nombreux, pourraient transmettre leurs bactéries et maladies aux poissons sauvages. Cerise sur le poisson : les infestations de poux qui parasitent les

Copyright © 2017 Editions Quae.

saumons de Norvège, principal fournisseur de la France. *Lepeophtheirus salmonis* est un crustacé d'environ un centimètre qui se fixe sur la peau des saumons et leur suce le sang jusqu'à l'apparition de plaies sujettes à infection. Inoffensifs pour l'humain, ces poux génèrent une importante mortalité chez les poissons d'élevage, en particulier les saumons. Ils semblent pulluler avec le réchauffement de la mer mais deviennent aussi de plus en plus résistants aux traitements utilisés par l'industrie. Les aquaculteurs trempent les saumons dans des bains désinfectants mais les traitements chimiques sont de moins en moins efficaces et de plus en plus décriés. Les professionnels tentent maintenant de les faire passer un à un dans un aspirateur à poux, ou encore, s'arment d'un pistolet laser dernier cri qui cible les indésirables ! Rien n'y fait, les poux font de la résistance. Prochaines étapes : des pièges à phéromones dotés de lumières bleues qui attirent les larves du pou ; des coquillages filtreurs comme le pétoncle géant qui absorbent et digèrent les larves du parasite ; et, le fin du fin, des poissons nettoyeurs chargés d'épouiller leurs cousins. Il s'agit alors d'une lutte biologique basée sur l'appétit de la vieille commune (*Labrus bergylta)* avec sa robe polychrome, ses yeux verts aux reflets bleutés et ses lèvres charnues, véritable dévoreuse de poux ou encore, sur le lompe (*Cyclopterus lumpus)* avec son corps massif et sa gueule de boxeur, recouvert de nodules cutanés, moins gourmand mais beaucoup plus résistant. Vous n'en avez certainement jamais entendu parler et pourtant, depuis 5 ans, la demande en lompes nettoyeurs s'est multipliée par mille ! Reste que ces « Mr. Propre » peuvent eux-mêmes transmettre des maladies infectieuses aux colonies de saumons et qu'ils ne servent que pour un cycle de production. Après quoi, dans le meilleur des cas, ils sont congelés en filets et expédiés en Asie pour

Copyright © 2017 Editions Quae.

2 dollars le kilo. Ce que critiquent les associations comme Greenpeace Norvège, c'est que le pou, qui se développe anormalement dans les bassins aquacoles, affecte ensuite les saumons sauvages. Les juvéniles qui descendent les fjords pour effectuer leur migration océanique survivent difficilement aux morsures des aliens.

En pisciculture marine, les aliments excédentaires non consommés par les poissons se répandent dans la mer, contribuant à sa détérioration et provoquant des pertes économiques inutiles pour les éleveurs. Longtemps problématique, cette suralimentation pourrait trouver une solution dans des systèmes de nourrissage automatiques qui s'améliorent depuis une quinzaine d'années. Le principe est d'alimenter le poisson en fonction de sa satiété. Plusieurs techniques existent déjà comme la localisation du cheptel *via* un faisceau ultrason. Il permet d'obtenir en direct une image de la satiété des poissons qui remontent à la surface lorsqu'ils ont faim.

Mais cela ne résout pas le problème des excréments… Imaginez 15 kilos de poissons par mètre cube, concentrés dans 10 bassins de 1 500 mètres cubes (25 mètres de diamètre sur 30 mètres de profondeur), flottants dans les eaux fraîches des fjords norvégiens. Ces sirènes consomment des farines végétales qu'elles digèrent mal, ce qui contribue à augmenter leurs quantités de fèces. L'écosystème local est déstabilisé au point d'en être parfois asphyxié. Du côté de l'Espagne, dans les rías Baixas, où de forts courants renouvellent l'eau des bassins et dispersent les déchets, tout va bien. Plus au nord, dans la mer Baltique, les bassins de truites arc-en-ciel, coincés dans l'incroyable mosaïque d'îles finlandaises, ont favorisé l'eutrophisation : le tapis d'algues qui s'est constitué aurait contribué à l'anoxie du milieu et l'effondrement des populations de poissons locaux.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Depuis dix ans, les progrès de la géo-informatisation des données côtières (mouvement des courants, typologie des fonds marins, etc.) devrait permettre, à l'avenir, de mieux répartir les cages de pisciculture. Avec ces données, il est possible de trouver les conditions optimales pour une bonne dispersion des excréments. « La nature fera le reste », pourrait être la conclusion.

Tout le monde n'envisage pas la dilution de ces rejets comme une solution satisfaisante. Aussi, des chercheurs canadiens tentent d'inventer un nouveau modèle d'aquaculture où le recyclage naturel des déchets serait contrôlé et même valorisé : en surface, une cage flottante de poissons, à proximité, des organismes filtreurs comme les pétoncles, les huîtres ou les palourdes qui absorbent les particules fines et à l'écart, des algues comme les laminaires se nourrissant des éléments inorganiques dissous (azote et phosphore) produits par ces précédents. La clé de voûte du système repose au fond de l'eau sur les espèces limivores (oursins, vers, concombres de mer…). Elles se nourrissent des aliments excédentaires qui s'échappent des cages et des déjections des poissons (grosses particules). Les premiers tests ont montré que les concombres de mer comme l'holothurie du Pacifique pouvaient consommer 80 % des sédiments accumulés sous les cages de morues charbonnières. Dans ce recyclage vertueux, les aquaculteurs trouvent aussi leur compte : chacune des espèces de la chaîne est commercialisable, y compris le concombre de mer consommé en Asie. D'ailleurs, cette façon circulaire d'envisager l'exploitation de la nature nous vient droit d'Asie où des systèmes similaires sont utilisés de longue date pour l'élevage de carpes dans des étangs. Ancestrale, cette production est aujourd'hui encore la plus importante des formes d'aquaculture au monde. En joignant la production de riz à celle de poisson,

Copyright © 2017 Editions Quae.

certains pays parviennent à valoriser le lisier aquacole, d'autres font de la co-culture canard/poisson, crevette/tilapia, saumon/moule… Tous les élevages asiatiques ne sont pas exemplaires pour autant : au Vietnam, les poissons-chats (panga) sont tassés « comme des sardines » à raison de 80 à 100 kilos par mètre cube dans l'un des fleuves les plus pollués au monde, le Mékong.

Pour le consommateur, savoir ce qu'ingurgite son poisson est important ; pour le citoyen, savoir ce qu'il rejette en mer aussi. Reste le riverain qui s'inquiète de l'espace occupé par ces bassins dans les zones côtières tant convoitées. Des projets visent une implantation éloignée des côtes : des bassins aquacoles pourraient être construits au pied des éoliennes marines, sur d'anciennes plateformes pétrolières reconverties ou sur les futures plateformes multi-services (énergies renouvelables, déchargement des conteneurs, activité de pêche, prospection pétrolière, etc.) prévues pour désengorger les ports *(voir « Plus besoin de terre ferme ! »)*. Un premier pilote de ferme aquacole offshore devrait être installé fin 2017 à des profondeurs de 100 à 300 mètres au large de la Norvège. Son principe repose sur les connaissances acquises par les plateformes pétrolières en mer : une structure semi-submersible d'un volume de 250 000 mètres cubes, de quoi élever 1,5 million de poissons par an. Cermaq, l'un des principaux salmoniculteurs mondiaux teste aussi des « fermes intelligentes » dans lesquelles une chambre de surveillance dotée de capteurs détecte la présence de poux, blessures, déformations ou arrêts de croissance. Ces mesures individualisées permettraient de traiter les poissons malades séparément des autres afin de diminuer l'usage de biocides. Loin des regards, informatisés, mécanisés, automatisés, ces bassins ne sont pas sans évoquer l'élevage industriel tant décrié à terre.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Autre solution envisagée, une aquaculture continentale en circuit fermé. En France, la production d'alevins est principalement basée sur ce type de système où les bassins à terre sont remplis d'une eau qui est épurée puis réinjectée dans le bassin, en circuit fermé. Des études en cours visent la mise au point de bassins similaires pour le grossissement des poissons. Actuellement, cette phase s'opère en mer car le coût énergétique du traitement de l'eau demeure prohibitif. Toutefois, grâce aux recherches scientifiques, les récents progrès permettent d'envisager pour l'avenir l'aquaculture en eau recyclée comme une option.

D'après le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), l'impact environnemental de l'aquaculture devrait doubler d'ici 2030. En attendant que les insectes se fassent farines, que les cages d'aquaculture deviennent vertueuses, certains en appellent à la frugalité. Sans forcément devenir végétarien, un peu moins de protéines animales dans l'assiette ne mettrait pas en danger notre santé d'Occidentaux bien nourris. Pour les mordus de poissons, il y a toujours l'option de manger des carpes, des tilapia et autres animaux herbivores qui n'ont pas ou peu besoin d'être nourris. Et pour les plus audacieux, qu'ils envisagent de changer radicalement d'alimentation…

ALGUES ET MÉDUSES : CHAUD DEVANT !

Et si demain nous mangions des hamburgers de méduses, des sautés de crépidules et des planchas de poissons-lions ? Ces espèces invasives sont parfois rebutantes et pourtant comestibles. Le poisson-lion aurait même une chair très délicate, déjà servie dans plusieurs restaurants à Cuba et aux États-Unis où il était considéré, il y a encore peu, comme gênant et envahissant. Originaire de l'océan

Copyright © 2017 Editions Quae.

Indo-Pacifique, cette espèce de rascasse, dotée de longues épines au puissant venin, est prisée des aquariophiles. Il est possible que des spécimens issus d'aquariums soient parvenus à s'échapper… Quoi qu'il en soit, ils ont été repérés sur les côtes de la Floride pour la première fois dans les années 1980. Avec une production annuelle de 2 millions d'œufs se laissant porter par les courants, *Pterois volitans* et *Pterois miles* ont rapidement conquis le golfe du Mexique et les Caraïbes. En Guadeloupe, on le signale pour la première fois en 2010. Cet *Attila* des mers dévore tout sur son passage et ses rares prédateurs, les mérous et carangues, sont eux-mêmes victimes de la surpêche. Il se gave de poissons herbivores qui, en temps de paix, se chargent de nettoyer les récifs coralliens des algues proliférantes. Il opère sur ces écosystèmes une razzia sans merci qui l'élève au rang des espèces invasives parmi les plus menaçantes. La plupart des pays ont le même mot d'ordre : pêchez, mangez ou tuez-le autant que vous le désirez. Il n'existe pas encore de pêcherie dédiée mais le marché existe : au Belize, dans les Caraïbes, mais également aux États-Unis où la chaîne de supermarché Whole Foods Market vend le poisson depuis 2016. C'est l'année où le programme Seafood Watch mené par l'aquarium de Monterey Bay (Californie) a recommandé sa consommation afin de mieux préserver les océans. Pour l'heure, les poissons-lions proviennent de captures non intentionnelles comme en Floride où 5 000 kilos ont été récupérés en 2012 dans les casiers de homards. Toutefois, un prototype de casiers dédié à sa capture a été mis au point par l'association de plongeurs Reef. Si les consommateurs confirment leur intérêt, il est possible qu'une pêcherie de poissons-lions voie le jour.

L'engouement n'est pas toujours au rendez-vous. Manque de curiosité gustative chez le consommateur ?

Copyright © 2017 Editions Quae.

Difficultés d'organisation du marché ? La crépidule, ce petit gastéropode qui a colonisé de nombreuses côtes, y compris les bretonnes, n'a pas connu la *Success Story* qu'on lui prédisait. Le coquillage débarque en Normandie avec les bateaux américains à la fin de la seconde guerre mondiale. Dans les années 1970, il reprend du poil de la bête avec un deuxième débarquement *via* l'importation et le transfert d'huîtres japonaises. Cet organisme filtreur et brouteur trouve tous les nutriments nécessaires dans l'Atlantique, n'a aucun prédateur et une reproduction très efficace (plusieurs fois par an). Résultat : il prolifère au point de perturber fortement les écosystèmes colonisés et les productions qui en sont issues, en particulier les coquilles Saint-Jacques. Son aspect de bonnet phrygien disparaît totalement dans les empilements qu'il forme à raison de 8 500 coquilles par mètre carré dans certains endroits. Accroché sur n'importe quel support, il entre en compétition avec les espèces locales pour la nourriture et l'espace. Aussi, tout un réseau d'acteurs a tenté de trouver une issue. Le schéma envisagé semblait idéal : depuis 2015, l'entreprise bretonne ALD ramassait les *Crepidula fornicata* avec un navire crépidulier, le *Papy*, puis séparait la chair de la coquille pour la congeler à des fins de consommation. Les coquilles broyées, fortement chargées en calcaire, servaient d'amendement pour les cultures locales. Certaines collectivités envisageaient même d'en faire des pavés drainant pour les parkings. La faisabilité technique de ces matériaux a été démontrée. Malheureusement, l'ensemble de ce schéma d'économie circulaire s'est effondré avec la liquidation judiciaire de la société de transformation ALD. Trop peu de vente, trop peu de consommateurs. Peut-être que les Français mettent du temps à accepter de nouveaux aliments dans leur assiette. Il a fallu plus de 40 ans pour que le bulot, autrefois totale-

Copyright © 2017 Editions Quae.

ment dévalorisé, devienne la première espèce négociée à la criée de Granville. Il est tellement convoité que les pêcheurs revendiquent désormais une reconnaissance de son origine géographique. Quant au pavé drainant constitué d'espèces invasives, il pourrait redevenir intéressant compte tenu de la pénurie annoncée de sables coquilliers *(voir « Les mines se vident, cap sur la mer ! »)*.

Le désintérêt pour la crépidule montre qu'en 2017, une ressource abondante ne fait pas forcément un aliment d'intérêt. Mais qu'en sera-t-il en 2050 ? Lorsque la population atteindra 9 milliards d'humains, que les terres arables auront diminué et que les quotas de pêche seront réduits au minimum, aurons-nous toujours les mêmes exigences ? Si les méduses gênent nos châteaux de sable sur la plage en Bretagne, elles régalent le palais des chinois depuis plus d'un millénaire. En Asie, 750 000 tonnes de méduses sont consommées chaque année. Dans leur ouvrage *Mange tes méduses !* les spécialistes de la filière halieutique Daniel Pauly et Philippe Cury expliquent comment le futur des océans s'annonce de plus en plus gélatineux. Avec une diminution de 85 % de leurs prédateurs (thons rouges, poissons-lunes, tortues luth, etc.), les méduses ont le champ libre. Leurs compétiteurs comme les anchois, pilchards, sardines, aloses et autres poissons fourrages sont éliminés par la surpêche et le chalutage qui détruit leur habitat. Le réchauffement des eaux semble également favoriser leur prolifération. Des incidents locaux ou régionaux se démultiplient un peu partout sur le globe : certaines plages de Méditerranée sont désormais dotées de filets pour éviter que les urticantes ne dérangent les baigneurs ; attirées par l'eau chaude rejetée aux abords des centrales nucléaires, elles menacent de bloquer les grilles d'arrivée d'eau nécessaire au refroidissement des centrales ; au Japon, la méduse géante *Nemopilema nomurai*

Copyright © 2017 Editions Quae.

qui peut atteindre 2 mètres de diamètre et 200 kilos, brûle les filets des pêcheurs ; dans les bassins aquacoles, elles se plaquent contre les grilles sous l'effet centripète généré par la rotation des poissons. Immobilisées, les méduses relâchent un mucus urticant qui irrite jusqu'à l'asphyxie les poissons. En 1998, la baie de Big Glory (Nouvelle-Zélande) a ainsi perdu 56 000 saumons en moins d'une demi-heure. Ces zombies des mers nous dérangent, alors pourquoi ne pas en faire notre pain quotidien ? Il est possible que nos petits-enfants y soient contraints mais les méduses, composées à 95 % d'eau et seulement 5 % de protéines, ne répondront pas facilement à une crise alimentaire. En revanche, manger les envahisseurs permettra peut-être de limiter les dégâts environnementaux.

Copyright © 2017 Editions Quae.

4

LA MER À NOTRE CHEVET

L'Homme interagit avec le milieu terrestre depuis des milliers d'années, avec la surface des océans depuis des centaines d'années, tandis que l'exploration sous-marine date des années 1950. Pas étonnant que seuls 10 % des 150 000 substances chimiques identifiées dans la nature et décrites proviennent des océans. Or, c'est en puisant dans ce répertoire génétique et moléculaire de substances naturelles que les chimistes parviennent à formuler de nouveaux produits : médicaments et produits de santé, crèmes et produits de soins, gélifiants et produits agroalimentaires.

Depuis quelques années, le dépôt de nouveaux brevets dans le domaine de la santé diminue. Pour renouveler la boîte à pharmacie, les chercheurs se tournent vers les océans encore peu explorés alors qu'ils renferment une incroyable chimiodiversité. Sous l'eau, 36 grandes lignées du règne animal sont représentées alors qu'elles ne sont que 17 sur terre. Et pour cause : la vie terrestre est apparue bien après les organismes marins qui, eux, se sont davantage adaptés et donc diversifiés.

L'exploration de cette chimiodiversité a été rendue possible grâce aux sciences omiques (génomiques, métagénomiques, métabolomiques…) dont les outils techno-

Copyright © 2017 Editions Quae.

logiques permettent d'étudier le matériel génétique. Ce secteur, désigné comme les « biotechnologies bleues », aurait généré un marché de 4,1 milliards de dollars en 2015. Profitant d'un vent favorable, plusieurs entreprises ont déjà hissé la voile et mis le cap sur ces ressources biologiques et génétiques.

LES REDOUTABLES ANTIDOTES DE LA MER

Imaginez des centaines d'individus accrochés aux rochers sous 4 mètres de fond de la Méditerranée. Cette colonie d'éponges appelées *Crambe crambe* sert de ferme marine à des groupes pharmaceutiques. Il y a des milliers d'années, l'homme est parvenu à traire des vaches pour en tirer un lait nourricier. Désormais, de nouvelles générations de fermiers stressent mécaniquement les éponges pour en extraire des substances chimiques aux effets thérapeutiques. Les *Crambe* diffusent naturellement des molécules toxiques pour se défendre. Il suffit de les chahuter pour qu'elles produisent individuellement 500 milligrammes de composé pur par an. Ce dernier contient plusieurs familles de molécules dont deux ont des propriétés intéressantes. L'une serait anticancéreuse, l'autre antifongique. Dans ce scénario futuriste, les groupes pharmaceutiques testeraient le potentiel thérapeutique et non-toxique de ces molécules lors d'études cliniques avec pour finalité l'obtention d'un médicament commercialisable. À l'université de Sophia Antipolis (Nice), Olivier Thomas, associé à ce projet dans l'équipe Processus chimiques et radiochimiques dans l'environnement, espère coupler les bassins de culture de *Crambe* avec d'autres formes d'aquaculture (algues, mollusques, poissons) de façon à rendre ces productions encore plus rentables.

Copyright © 2017 Editions Quae.

En 2017, trois composés issus d'éponges marines ont déjà reçu une autorisation officielle de mise sur le marché, par la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis et par l'European Medecine Agency (EMEA) en Europe : l'éribuline sert d'anticancéreux contre le carcinome mammaire (nom commercial : Halaven) ; ce composé a été découvert grâce aux substances dégagées par des éponges *Halichondria okadai* de couleur noire se trouvant sur les côtes japonaises. Cytarabine contre le cancer (nom commercial : Cytosar-U) et Vidarabine antiviral contre les herpès (nom commercial : Vira-A) ont été découverts grâce à l'éponge *Criptotethya crypta* de la lagune des îles Elliot Key (Floride). Les éponges ne sont pas seules en mer à produire des substances d'intérêt thérapeutique : le cône *Conus magnus* des Philippines produit un antalgique mille fois plus puissant que la morphine ; la seringue de mer *Ecteinascidia turbinata,* un tunicier colonisant des racines de mangroves des Caraïbes, produit une substance permettant de lutter contre les sarcomes (cancer des tissus mous comme les muscles et la graisse) ; le mollusque *Dolabella auricularia* produit lui aussi un anticancéreux pouvant agir sur le lymphome hodgkinien. Au moins 8 médicaments actuellement commercialisés proviennent de la mer. Ce chiffre peut sembler ridiculement petit vu les quantités de produits présentés sur les étagères des pharmacies ou des hôpitaux : pas moins de 11 000 spécialités, préparées à partir des 2 800 substances actives disponibles sur le marché français en 2013. On peut toutefois difficilement comparer un Doliprane® qui soigne des maux de tête avec un anticancéreux… Les composés issus de la mer sont très puissants et c'est là tout leur intérêt : les chercheurs espèrent en extraire des traitements contre des maladies considérées incurables. D'ailleurs, l'essentiel des médicaments tirés de

Copyright © 2017 Editions Quae.

la mer ne sont pas disponibles en officine ; ils sont utilisés principalement en milieu hospitalier pour traiter des problèmes graves et chroniques comme les cancers, la sclérose en plaques ou l'arthrite rhumatoïde. Par ailleurs, ce marché est encore tout jeune puisque la plupart des médicaments ont obtenu une autorisation de mise sur le marché au milieu des années 2000 !

Vous avez certainement lu ou entendu parler dans les médias d'une étoile de mer produisant de la roscovitine efficace contre les macrophages responsables d'infections pulmonaires chez les personnes atteintes de mucoviscidose ; d'un cône marin excrétant un antidouleur qui s'élimine rapidement mais dont les effets bénéfiques se prolongent plusieurs jours dans l'organisme douloureux ; d'une ascidie coloniale (*Aplidium albicans*) rejetant des molécules qui sauraient lutter contre les tumeurs du pancréas ou de la prostate,… une quarantaine de composés d'origine marine et d'intérêt thérapeutique suivent actuellement une évaluation clinique concernant leur efficacité, leur stabilité, l'absence de toxicité, leur tolérance, etc. Un long parcours qui ne prendra pas moins d'une quinzaine d'années et dont l'issue n'est pas garantie. En laboratoire, plus d'un millier de molécules ont démontré des activités antitumorales, antibiotiques, antivirales, anti-inflammatoires, en somme, tous les « anti » qui soignent. De quoi soulever beaucoup d'espoirs pour des applications en médecine. D'autant plus d'espoirs qu'en termes de molécules marines, nous ne voyons que le dessus de l'iceberg.

Près de 180 000 espèces marines ont été répertoriées à ce jour et seulement 5 % ont fait l'objet d'études portant sur leur intérêt biotechnologique. Il existerait au moins 250 000 espèces connues mais non décrites. D'après les extrapolations Census of Marine Life, il y aurait au moins

Copyright © 2017 Editions Quae.

un million de formes d'espèces sous-marines et des dizaines, voire des centaines, de millions de microbes… Toute cette biodiversité crée une fabuleuse chimiodiversité dans laquelle puiser des molécules pour tester leur intérêt thérapeutique. Il y a trente ans, les études scientifiques se sont naturellement portées sur les algues et les invertébrés macroscopiques (mollusques, cônes, coraux, anémones, lièvres et escargots de mer…) dont la faible mobilité imposait une communication et une défense reposant sur des moyens chimiques. À terre, la fleur émet des molécules olfactives pour attirer les insectes pollinisateurs. En mer, les animaux sessiles excrètent un grand nombre de molécules toxiques pour leur assurer une protection contre d'éventuelles agressions de différentes natures. Les études scientifiques ne permettent pas toujours d'identifier le mécanisme producteur de cette substance chimiquement active. S'agit-il du macroorganisme lui-même ou des hôtes microscopiques qu'il héberge ? Votre médecin vous a peut-être déjà parlé des milliards de bactéries que renferment vos intestins. Ces amies qui vous veulent du bien, à l'origine de tout un tas de processus favorisant la digestion, sont plus nombreuses que vos propres cellules corporelles. Dans certaines éponges, les microorganismes peuvent représenter jusqu'à 50 % de la biomasse ! Il est tout à fait probable que ces bactéries dites symbiontes jouent un rôle dans la production des armes chimiques des animaux marins. C'est le cas du bryozoaire *Bugula neritina,* un animal qui s'accroche au substrat dur dans les ports et dont la forme évoque plutôt un lichen. On a découvert qu'il produisait un anticancéreux actuellement en évaluation clinique. Des études poussées ont démontré que la véritable source de cet anticancéreux était une bactérie symbionte (*Candidatus endobugula sertula*) vivant à l'intérieur du bryozoaire.

Copyright © 2017 Editions Quae.

En parallèle de ces découvertes, des missions océanographiques comme *Tara Oceans* ont permis de révéler la diversité et l'abondance des microorganismes marins. On entend souvent parler de cette goélette qui parcourt les surfaces marines pour mieux comprendre l'état des océans mais l'analyse des échantillons d'eau prélevés est moins relayée. Une analyse rendue possible grâce aux outils extrêmement puissants des sciences omiques. Ce travail a permis de découvrir que les microorganismes marins constituent près de 90 % de la biomasse marine. Dans un millilitre d'eau de mer s'agitent plusieurs millions de cellules, bactéries et virus ! Or, ces invisibles produisent, eux aussi, des molécules d'intérêt thérapeutique. Elles ont pour fonction de protéger le microorganisme d'un milieu hostile : pour résister à des températures très basses dans les pôles, certaines bactéries produisent des acides gras insaturés (dont les fameux oméga 3) ce qui rend leur membrane plus flexible ; des bactéries thermophiles et hyperthermophiles (vivant à plus de 80 °C) s'adaptent à la fournaise des sources hydrothermales en renforçant les membranes de leurs cellules grâce à des lipides complexes ; d'autres survivent sous un kilomètre de plancher océanique grâce à des propriétés piézophiles ; dans les tapis microbiens des atolls polynésiens (anciennes mares fossilisées en sédiments dans lesquelles se trouvent les plus anciennes traces de vie), des microorganismes se développent dans des conditions inhabituelles de gradients de pH, de salinité et de concentrations d'oxygène dissous. Toutes ces propriétés induisent chez les microorganismes la synthèse de substances pouvant présenter des intérêts en pharmacologie.

Une fois l'organisme marin identifié, le composé testé, ses propriétés avérées, demeure une question cruciale pour envisager d'en faire un médicament. Comment

Copyright © 2017 Editions Quae.

produire les molécules d'intérêt à l'échelle industrielle ? Les prélever dans le milieu naturel étant exclu pour des raisons évidentes de sauvegarde, reste la possibilité de les cultiver comme cela pourrait être le cas des éponges *Crambe.* Mais l'aquaculture semble se heurter à des problèmes de mise en œuvre et d'espace disponible. D'ailleurs, si Olivier Thomas compte déployer son concept pour la phase test des molécules, en revanche, leur développement industriel doit se faire par une autre voie moins coûteuse d'espace et de travail. À titre d'exemple, il faut plus de 13 tonnes du bryozoaire *Bugula neritina* pour obtenir 18 grammes de molécules actives quand 1 à 5 kilos sont nécessaires pour répondre à la demande annuelle. Au diable la nature et ses contraintes, pourquoi ne pas synthétiser chimiquement ces si précieuses molécules ? Hélas, cela n'a rien d'évident : la complexité de ces molécules organiques est telle que leur synthèse est souvent inabordable. La palytoxine isolée du venin d'un corail hawaïen est formée de 129 atomes de carbone, 223 atomes d'hydrogène, 3 atomes d'azote et 54 atomes d'oxygène…, une structure impressionnante pour une molécule considérée comme l'un des plus puissants vasoconstricteurs. Demandez à des aquariophiles des milieux récifaux, tous ont entendu parler des redoutables piqûres de ce magnifique corail en forme de fleur. Synthétiser les longues chaînes de palytoxine est possible mais encore trop laborieux et donc coûteux pour envisager un développement à grande échelle. Même chose pour l'anticancéreux discodermolide isolé de la belle éponge caribéenne *Discodermia dissoluta* qui nécessitait plus de 39 étapes chimiques pour être synthétisé… son développement a été abandonné sans que l'entreprise pharmaceutique n'en divulgue la raison. Dernière solution, probablement l'une des plus courantes : l'hémisynthèse. La technique consiste

Copyright © 2017 Editions Quae.

à démarrer la synthèse à partir d'un composé naturel possédant déjà une partie de la molécule visée *in fine*.

Au laboratoire nantais Écosystèmes microbiens et molécules marines pour les biotechnologies (Ifremer), l'équipe de Sylvia Colliec-Jouault a identifié un composé ayant la propriété de réparer les tissus (muscles, os, cartilages). Il est produit par une bactérie isolée d'un fluide froid à proximité de sources hydrothermales au nord du bassin de Guaymas (Pacifique). Les microbiologistes ont baptisé cette bactérie du nom d'*Alteromonas infernus*. Les analyses chimiques ont permis d'identifier ce composé comme étant un polymère complexe de sucres (exo-polysaccharide) ayant la propriété d'accélérer la régénération des tissus animaux. Mais pour une application en santé humaine, ce polysaccharide doit néanmoins être modifié afin de le rendre plus proche de la taille et de la structure des polysaccharides de cellules humaines. Le polysaccharide modifié a été ajouté à un hydrogel créé par le Centre hospitalier universitaire de Nantes pour favoriser la régénération du cartilage. Avec cet ajout, les cellules souches contenues dans l'hydrogel se différencient plus rapidement en cellules de cartilage, or cette cinétique est essentielle pour que l'opération réussisse. Cet hydrogel n'a pas été testé sur des lésions humaines et devra encore subir tout un tas d'évaluations avant commercialisation. Toutefois, aux yeux des industriels, ce candidat-médicament possède un point fort : la production de la molécule bioactive est maîtrisée. Le polymère modifié peut être obtenu en 48 heures par la mise en culture d'*A. infernus* dans des fermenteurs. Sa production est indépendante d'aléas extérieurs comme les saisons, aléas climatiques et de toute compétition avec d'autres microorganismes. « En santé tout comme en cosmétique, les industriels veulent des milieux de culture parfaitement contrôlés et standards

Copyright © 2017 Editions Quae.

avec une traçabilité totale. C'est pourquoi, ils s'intéressent de plus en plus aux microorganismes comme les bactéries. L'autre tendance est de s'orienter vers des synthèses enzymatiques, on parle de biosynthèse, dont l'intérêt est de contourner la synthèse chimique » rapporte Sylvia Colliec-Jouault qui travaille depuis 30 ans dans ce secteur. Pour le polysaccharide issu d'*A. infernus,* cela consiste à rechercher les enzymes capables de le produire mais aussi de faire la modification qui le rapproche des dimensions de polysaccharides humains. « Aujourd'hui, nous cherchons dans le génome d'*A. infernus* la portion de gènes qui code pour ces enzymes. Si nous parvenons à l'isoler, nous pourrons peut-être développer des bioprocédés pour fabriquer les polysaccharides modifiés sans synthèse chimique. Pour nous, c'est l'avenir des biotechnologies marines » s'enthousiasme la chercheuse. Le revers de la médaille : la biosynthèse peut faire appel à la manipulation génétique avec transfert de gènes d'un organisme à l'autre. En l'occurrence, l'équipe nantaise tente d'identifier la séquence génétique à l'origine des enzymes qui peuvent faire le travail à la place des produits chimiques. Une fois isolée, cette séquence pourrait être insérée dans *E. coli*, une bactérie couramment utilisée en laboratoire, afin que celle-ci produise les enzymes en quantité importante. Les manipulations de ce genre sont monnaie courante dans les laboratoires pharmaceutiques et cosmétologiques. Pour les premiers, il s'agit d'évaluer le bénéfice (sauver une vie humaine), au regard du risque (utiliser des OGM). Pour les seconds, l'étiquette du « bio » synthétisé, sans chimie (quitte à utiliser un peu d'OGM) semble l'emporter. Mais, vu l'allure avec laquelle les technologies évoluent, comme la révolution en cours avec la mise en œuvre de Crispr-Cas9, ainsi que les modes, il n'est pas impossible que ces tendances soient renversées d'ici 2050…

Copyright © 2017 Editions Quae.

DU SANG D'ANNÉLIDE AU DISPOSITIF MÉDICAL

Vous avez certainement croisé au fil d'une balade le long d'un estran ces petits tortillons de sable qui balisent les plages. « Des cacas de vers ! », s'écrient les enfants. Effectivement, ces édifices sont formés par des vers marins appelés *Arenicola marina*. Ce n'est pas un vulgaire invertébré mais un véritable héros pour lequel une entreprise bretonne Hémarina est prête à déplacer des montagnes. Depuis 450 millions d'années, ces animaux ont réussi à s'adapter à être privés d'air la moitié du temps, en emmagasinant d'importantes quantités d'oxygène à marée basse. L'hémoglobine de ce ver est capable de transporter 150 fois plus d'oxygène que l'hémoglobine humaine. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives pour la préservation des organes en attente de transplantation. La solution mise au point par la *start-up* Hémarina à partir du sang d'*Arenicola marina* permet de préserver les greffons dans des conditions optimales pendant sept jours contre seulement quelques heures dans les liquides actuellement sur le marché. À ce jour, une soixantaine de greffes ont été réalisées dans le cadre d'essais cliniques. Sans plus attendre, Hémarina a déjà installé sa propre exploitation aquacole : sur le site de Noirmoutier, l'objectif à terme est d'élever 30 tonnes de vers pour obtenir une tonne de ce « transporteur d'oxygène ». Cette histoire a pourtant débuté avec une question de jeune thésard en recherche fondamentale à la station biologique de Roscoff (CNRS) : comment ces annélides font-ils pour respirer à marée basse ? En injectant leur sang dans une souris, l'actuel directeur de l'entreprise s'est aperçu que l'hémoglobine des vers était compatible avec toutes les lettres de l'alphabet sanguin (O, A, B). En deux mots, il venait de découvrir un sang universel.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Le sang universel extrait des vers, purifié et transformé par Hémarina n'est pas à proprement parler un médicament et relèvera peut-être d'une autre réglementation. Dispositifs médicaux, produits sanguins, greffes et dons d'organes, implants mammaires et produits cosmétiques sont une partie des autres produits de santé commercialisés. Prenez le dispositif médical, son objectif est de diagnostiquer, prévenir, contrôler, traiter ou atténuer une maladie, son action principale n'est pas obtenue par des moyens pharmacologiques, immunologiques ou métaboliques (mais sa fonction peut être assistée par de tels moyens). Matériau innovant, logiciel, prothèse, équipement, déjà plus de trente dispositifs médicaux provenant de la mer sont utilisés. Les compresses sont un bon exemple, on suppose qu'il s'agit d'un simple bout de coton tissé et stérilisé, mais certaines sont enduites d'alginates marins dont les propriétés hémostatiques (qui arrêtent les saignements) et réparatrices ont été éprouvées. Ces alginates sont extraits des algues brunes de type *Macrocystis pyrifera, Laminaria digitata, Laminaria saccharina* par broyage, filtration, et autres procédés biologiques assez simples. Hypoallergéniques, les alginates peuvent également servir de base pour les moulages dentaires ou de pansement gastrique en cas de brûlure d'estomac. La liste des applications est très longue. La chitine, extraite des carapaces de certains crustacés, des coquilles de céphalopodes (Nautile) ou d'invertébrés marins, est un biopolymère résistant et biodégradable. Une fois purifiée, elle entre dans la composition des fils de suture chirurgicaux. Les carraghénanes que renferment les algues rouges *Eucheuma* et *Chondrus* sp. permettent d'élaborer des antivirus commercialisés dans des sprays nasaux contre les rhinovirus. La silice formée par certaines éponges sert au revêtement d'implants métalliques. L'agar, polymère issu des algues rouges, est utilisé comme milieu de

Copyright © 2017 Editions Quae.

culture pour la fabrication de vaccins. Les biopolymères que fabriquent certaines bactéries marines sont particulièrement prometteurs.

Se soigner grâce aux organismes vivants terrestres ou marins n'a rien d'original, c'est toute l'histoire de la pharmacopée. Dans le *Traité universel des drogues simples*, rédigé sous Louis XIV, un médecin apothicaire décrivait une préparation à base de perles huîtrières : « On prépare les perles en les broyant sur le porphyre (roche magmatique) jusqu'à ce qu'elles soient réduites en poudre impalpable. Leur principale vertu est de détruire et d'amortir les acides comme font les autres matières alcalines. Elles sont bonnes pour les accrêtées de l'estomac, la faim canine, les hémorragies. Les doses sont depuis 6 grains jusqu'à un demi-gramme. » L'avantage du XXIe siècle, c'est que nous disposons de technologies nous permettant d'exploiter plus largement les nombreuses propriétés des organismes marins. En 2008, le prix Nobel de chimie a été remis à un Japonais et deux Américains pour avoir découvert et développé une protéine fluorescente isolée des méduses *Aequorea victoria.* Pendant l'été 1961, l'équipe a collecté près de 10 000 spécimens sur les plages californiennes afin d'en extraire la protéine GFP (*Green Fluorescent Protein*). Sous l'action des UV, elle émet de la fluorescence, ce qui permet de l'envisager comme traceur biologique. Une fois injectée dans l'organisme étudié, on peut suivre son évolution au sein des cellules. Des processus invisibles se sont ainsi dévoilés, en particulier la prolifération de cellules cancéreuses et le développement de cellules nerveuses dans le cerveau. GFP n'est pas le seul composé marin dont on utilise la bioluminescence. L'enzyme luciférase, extraite de la bactérie marine *Vibrio fischeri,* sert également de traceur en biologie moléculaire. Autre enzyme intéressant, le SAP (*Shrimp Alkaline Phosphatase*)

Copyright © 2017 Editions Quae.

issu de la crevette extrêmophile *Pandalus borealis* qui vit dans les eaux froides de l'Atlantique et du Pacifique. Son avantage est de s'inactiver en moins de 15 minutes à 65 °C.

L'un des grands succès commerciaux des outils médicaux d'origine marine est lié à la méthode PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Son objectif est d'obtenir une quantité importante d'un segment d'ADN précis à partir d'un échantillon peu abondant. Cette technique est utilisée en recherche fondamentale, en médecine légale et clinique, ou encore par la cosmétique et l'agroalimentaire (pour vérifier l'absence d'organismes génétiquement modifiés). Les duplications de morceaux d'ADN ont été assurées tout d'abord par des enzymes extraites de *Thermus aquaticus* (*Taq Polymerase*), des bactéries extrêmophiles prélevées dans une source géothermale au sein du Parc national américain de Yellowstone. Toutefois, les propriétés de cet enzyme ne permettaient pas une détection optimale et robuste des mutations de brin d'ADN. Une limite dépassée grâce à la découverte de nouveaux enzymes issus des microorganismes des genres *Pyrococcus* et *Thermococcus*, récoltés dans des sources hydrothermales marines. C'est le cas de la polymérase Isis, développée conjointement par l'Ifremer et la société MP Biomedicals. Elle provient de *Pyrococcus abyssii*, un organisme isolé d'une cheminée hydrothermale par 3 000 mètres de profondeur dans le bassin nord-fidjien et son taux d'erreurs est 40 fois moins important que celui de la *Taq Polymerase* de Yellowstone.

Autre grand succès mais dans le secteur du cinéma cette fois : *Alien*. Pour dessiner le monstre de ce film de science-fiction, Hans Rudi Giger s'est inspiré d'une limule, un arthropode pouvant mesurer 70 centimètres, sorte de crabe marin doté d'une longue queue dure comme un dard qui lui permet de se redresser et de se diriger. Ses ancêtres appartenaient à la famille des trilobites disparue il y a

Copyright © 2017 Editions Quae.

350 millions d'années. Malgré ses allures préhistoriques, cet animal possède un sang bleu couramment utilisé pour tester la pureté des matériaux chirurgicaux, des implants et autres produits injectables dans le corps humain. En présence de certaines bactéries, le liquide bleu coagule, ce qui en fait un parfait mouchard des contaminations bactériennes. Pour fabriquer le test de détection bactérien LAL (lysat d'amibiocytes de limule), l'espèce *Limulus polyphemus* est prélevée sur les côtes d'Amérique du Nord depuis les années 70. Un tiers du sang est retiré de chaque spécimen qui est ensuite relâché en mer. Toutefois, de récentes études signalent qu'au moins 15 % des animaux ne survivent pas après la saignée : 70 600 animaux auraient ainsi disparu en 2016. Il existe trois autres espèces de limules dont une, *Tachypleus tridentatus,* est extraite des mangroves asiatiques s'étalant du Japon à l'Indonésie. Son sang est recherché pour des usages similaires, à savoir la fabrication de test TAL (principalement vendus en Chine) mais la chair est consommée et la carapace séchée peut être valorisée en chitine. Dans le Pacifique, aucune estimation ne permet de connaître l'incidence de cette exploitation. Elles sont également chassées pour leur carapace qui est utilisée comme appât afin d'attirer les poissons, en particulier les anguilles. D'après la principale association de sauvegarde des limules (ERDG), il existe des méthodes alternatives aux tests LAL et TAL, entre autres une molécule de synthèse mimant les propriétés du sang bleu. Mais les laboratoires pharmaceutiques ne voient pas la situation du même œil : il manque encore quelques coûteuses évaluations pour démontrer que ces tests alternatifs sont de bons substituts… en attendant la collecte de sang bleu continue. Rares, des pratiques de ce genre incitent tout de même les experts à réfléchir aux moyens de mieux préserver les ressources biologiques de la mer (*voir « La mer à notre chevet »*).

Copyright © 2017 Editions Quae.

En 2050, la médecine aura certainement un nouveau visage, celui de la nanomédecine. Son objectif ? Optimiser la délivrance des médicaments en ciblant spécifiquement des tissus ou des cellules. Les nanovecteurs, des transporteurs de médicaments extrêmement petits, sont recouverts de capteurs biologiques qui permettent d'atteindre uniquement les cellules malades. *In fine*, on peut réduire les doses de médicaments et les effets secondaires. Outre la thérapie, deux autres applications semblent prometteuses : le diagnostic médical et le suivi des patients. Une quarantaine de nanomédicaments est déjà approuvée aux États-Unis et une vingtaine en Europe (2015). Il existe plusieurs types de nanoparticules : nanotube de carbone, fullerène, polymère, silices, oxydes métalliques, liposomes… Les nanoparticules de silice sont obtenues *via* la chimie douce, en mimant les diatomées. Ces microalgues vivent à des profondeurs de 200 mètres et sont représentées par au moins 200 000 espèces (eaux douces et marines). Elles possèdent une coque appelée « frustule » constituée de silice dont les formes rivalisent d'originalité et d'esthétisme d'une espèce à l'autre. Regarder un échantillon de diatomées au microscope, c'est comme admirer les rosaces qui se déploient au fond d'un kaléidoscope. « Il y a peu d'objets plus admirables que les délicates enveloppes siliceuses des diatomées. N'ont-elles donc été créées que pour que l'homme puisse les admirer ? », écrivait Charles Darwin dans son ouvrage *L'origine des espèces*. Les chimistes ont enfermé des médicaments dans ces coques de silice parce qu'elles sont poreuses, inertes et ne déclenchent pas de réaction de rejet. Elles peuvent contenir 50 à 60 fois leur propre poids en molécules bioactives. Au laboratoire Chimie de la matière condensée de Paris (CNRS/Collège de France/université Pierre et Marie Curie), des chercheurs en collaboration avec

Copyright © 2017 Editions Quae.

l'Imperial College de Londres ont transformé ces billes de silice en véritables « couteaux-suisses thérapeutiques » : elles combinent deux modes de traitement des tumeurs (chimiothérapie et thérapie photothermique) et trois techniques d'imagerie (IRM, imagerie par fluorescence et photoacoustique). Prochain objectif : rendre ces objets biodégradables, c'est un enjeu fort des nanoparticules dont nombre d'associations dénoncent aujourd'hui leur possible impact sur la santé humaine. Les polymères produits par certaines bactéries marines ont précisément l'avantage d'être biocompatibles et biodégradables, c'est pourquoi les recherches s'orientent vers ce domaine très prometteur pour la libération contrôlée de principes actifs (sous la forme de gels, de patch, nanocapsules ou nanoparticules).

DES VERS DE POMPÉI POUR SE POMPONNER

Dans *Moby Dick*, le capitaine Achab poursuit rageusement et avec démence une baleine tandis que ses officiers et les marins chassent les cachalots pour leur spermaceti. Cette sécrétion blanche, contenue dans le crâne du cachalot, était confondue avec du sperme par les anciens. On pense aujourd'hui que cette cire huileuse aide l'animal à faire le yoyo dans l'eau (flottabilité) et à se localiser (écholocalisation). Dans le grand classique d'Herman Melville, le narrateur traverse un épisode extatique au contact de ce lipide : « Notre rôle était d'écraser ces grumeaux à la main pour les faire redevenir liquides. Un doux et onctueux travail. Rien d'étonnant à ce que le spermaceti ait été autrefois un cosmétique si en faveur, lui si doux, si clair, si souple, si délicieusement mou. Après y avoir tenu mes mains pendant seulement quelques minutes, mes doigts étaient devenus souples comme des

Copyright © 2017 Editions Quae.

anguilles et je les sentais commencer à (pour ainsi dire) serpenter et à onduler […] Je reniflais cet arôme sans souillure ; il était tout à fait comme l'odeur des violettes de printemps. À ce moment, je l'affirme, je vivais comme dans un pré embaumé. »

La chasse au cachalot étant interdite depuis 1982, le palmytate de cétyle extrait du spermaceti pour servir d'émollient (adoucissant et assouplissant) dans les crèmes de beauté a été remplacé par des cires végétales (jojoba). Pour autant, le secteur cosmétique n'a pas abandonné le milieu marin. Depuis les années 1980, les algues sont exploitées pour en extraire des agents émulsionnants et gélifiants afin de fabriquer des masques, des pommades ou des dentifrices. Il s'agit, dans ce cas, de donner une texture couvrante aux produits de soins. Les algues brunes laminaires sont emblématiques de cette utilisation : caoutchouteuses, elles s'accrochent aux rochers grâce à de solides crampons et s'étirent comme un flexible sur un à trois mètres au bout duquel se trouve une large feuille lisse appelée fronde. Les constituants majoritaires de ces algues (15 à 45 %) sont les alginates, utilisés comme agents de texture aussi bien en agroalimentaire (sauce, glace, bonbon, etc.) qu'en cosmétique. Avec l'avènement des biotechnologies et l'engouement pour la « naturalité » des crèmes, la recherche s'est portée sur les principes actifs de ces végétaux marins. Objectif : trouver des molécules bioactives dont les vertus affirmées ou avérées s'étendent sur une large gamme de propriétés : anti-vieillissement, anti-rides, anti-rougeur, anti-pollution, anti-cellulite, anti-UV… Propriétés que les algues ont développées au fil de l'adaptation dans le but de se préserver.

Le vent, les marées, les écarts de température et de salinité sont des facteurs de « stress » pour les algues. Les humains sont également soumis à divers stress mais, alors

Copyright © 2017 Editions Quae.

que les plantes aquatiques ont mis au point des techniques pour se défendre, les hommes résistent bien difficilement aux agressions externes. Aussi, divers laboratoires cosmétiques se sont emparés des propriétés des algues à notre bénéfice. Privées d'eau à chaque marée basse, certaines algues brunes développent des résistances au dessèchement intense. De quoi inspirer un bel hydratant ! C'est ce qu'a fait le laboratoire Thalgo avec l'algue brune *Lessonia nigrescens* qui vit dans les zones intertidales de la côte Pacifique sud-américaine soumises à de forts courants. Le Laboratoire de la mer de Saint-Malo loue les vertus antivirales de l'une de ses crèmes, empruntées à *Laminaria digitata (*déjà utilisée depuis les années 1980 pour la texture des crèmes). La délicate *Jania rubens* est une algue rouge constituée de branches effilées formant une pelote de laine de 5 centimètres. Sa concentration en minéraux et en oligoéléments, 20 000 à 40 000 fois supérieure à celle de l'eau de mer, lui confère des propriétés reminéralisantes appréciées en cosmétique. Le laboratoire Codif, pionnier de l'utilisation d'extraits marins en cosmétique, utilise cette algue pour réguler le stockage des graisses. En somme, une crème anticellulite…

Des dizaines d'entreprises utilisent des algues pour la cosmétologie en Bretagne. Les sociétés bretonnes fournissent les grands noms de la beauté tels que Estée Lauder, Shiseido, L'Oréal… mais l'histoire entre la cosmétique et la mer ne se limite pas aux algues. Les recherches biotechnologiques ayant mis en évidence des principes actifs dans d'autres organismes marins, des produits de soins à base de bactéries, de cyanobactéries, de microalgues ou, plus rarement d'animaux, voient aussi le jour. Isolée d'un annélide récolté à 2 600 mètres de profondeur et baptisé ver de Pompéi, une bactérie *Alteromonas macleodii* survit sans oxygène et sans lumière, dans les failles séparant les

Copyright © 2017 Editions Quae.

plaques tectoniques. Soumise à un stress elle produit une substance (un polysaccharide) utilisée par Lucas Meyer Cosmetics afin d'apaiser et de protéger les peaux sensibles. Sur les flancs des fumeurs noirs du golfe de Californie, la bactérie *Thermus thermophilus* fabrique une molécule capable de protéger et réparer des agressions dues au soleil dont les vertus sont exploitées par le laboratoire Sederma (Vénuceane). Dans les récifs coralliens des Caraïbes, la gorgone *Pseudopterogorgia elisabethae* offre des propriétés chimiques anti-inflammatoires que les laboratoires Estée Lauder exploitent dans leur crème phare (Resilience).

Avec des propriétés anti-inflammatoires ou anti-virales, ces actifs évoquent davantage l'univers médical que celui des cosmétiques. Aussi, on parle désormais de cosméceutique, sans pour autant qu'un statut réglementaire soit accordé à cette branche de la cosmétique. S'agit-il de l'avenir des crèmes ? Peu d'études s'aventurent dans de la prospective en cosmétique. Alors qu'une branche des industriels vante les mérites à venir des lasers, des ultrasons ou de la cosmétotextile, personne n'avait prédit le boom des crèmes « sans parabène » ni l'essor actuel de la « neurocosmétique ». Une chose pourtant demeure sûre : le mouvement mondial de concentration de la population sur la bande littorale (70 % des mégapoles situées sur le littoral) pourrait certainement engendrer une sensibilité, voire un intérêt pour les produits qui en sont issus.

ENCADRER L'EXPLOITATION ET REDISTRIBUER LES BÉNÉFICES

Les ressources génétiques sont porteuses d'espoirs pour l'Homme mais comment mieux les préserver des menaces qui se multiplient et grandissent ? Réchauffement climatique et surpêche font l'objet de réglementations dont il

Copyright © 2017 Editions Quae.

faut espérer qu'elles déboucheront sur une inversion des tendances (*voir « Le grand chamboulement » et « La chimie verte vire au bleu »*). Autre accusé, les pollutions dont 80 % proviendraient de l'espace terrestre : urbanisation du littoral, extractions minières, eaux des rivières et eaux usées chargées de polluants chimiques, industriels et agricoles… Une liste à la Prévert, malheureusement aussi connue que l'auteur du poème. Le stade ultime d'une zone polluée ressemble à un « trou noir » dans lequel la vie a disparu par manque d'oxygène. C'est une « zone morte ». Fin 2016, une étude des biogéochimistes de l'Institut Max Planck pointait dans le golfe du Bengale une future zone morte sur une superficie deux fois supérieure à celle de la Belgique. Elle n'est pas encore totalement dénuée d'oxygène mais elle est presque aussi grande que la plus large des 400 zones mortes répertoriées en 2008 (qui occupent au total 245 000 kilomètres carrés). Au large de l'Inde, l'hypoxie menace les mammifères marins et les poissons d'asphyxie. Si l'oxygène se retire complètement, les crustacés seront trop lents pour fuir et mourront eux aussi. Quant aux organismes fixés (moules, huîtres) et coloniaux (coraux), leur putréfaction accentuera le phénomène. Le starter de cette tragédie serait les engrais azotés qui provoquent une eutrophisation du milieu. La prolifération des algues par excès de nutriments étouffe progressivement l'écosystème en puisant tout le dioxygène. Les dernières études montrent que les courants et la turbidité influencent ce phénomène, tout comme le réchauffement.

Au banc des accusés se trouvent également les espèces invasives qui entrent en compétition avec les espèces autochtones et réduisent le spectre de la biodiversité. En Méditerranée, près de 5 % des espèces marines sont considérées comme exotiques. Dans leur milieu d'origine, elles vivent en équilibre avec l'écosystème mais en péné-

Copyright © 2017 Editions Quae.

trant les eaux méditerranéennes, 13 % d'entre elles sont devenues envahissantes. La mer d'Ulysse accueille bien les voyageuses : elle abrite le plus grand nombre de plantes marines introduites au monde. Sur les 60 macroalgues allochtones au moins 8 sont à l'origine d'invasions graves. En 1984, l'algue verte australienne *Caulerpa taxifolia* colonisait le littoral à vive allure. Depuis dix ans, elle régresse sans que l'on sache pourquoi. Mais la saga continue avec sa cousine, la célèbre *Caulerpa racemosa* qui s'est propagée dans l'ensemble de la Méditerranée. Petite de taille, elle n'en forme pas moins un épais tapis de tiges rampantes (les stolons) et de racines (rhizoïdes). Le plus délirant des films d'horreur ne ferait pas mieux : étendue sur un mètre carré, l'envahisseuse peut déployer un kilomètre de stolons ! Dans le Parc national de Port-Cros, *Caulerpa racemosa* affecte les colonies juvéniles de la gorgone *Paramuricea clavata* et la reproduction des communautés d'éponges. Ce qui a justifié des campagnes d'arrachage en plongée. La liste noire des espèces invasives ne se limite pas aux algues : poissons, cnidaires, crustacés, mollusques, ascidies peuvent eux aussi faire partie des espèces migrant *via* les eaux de ballast des navires, le *biofouling* (accrochage sur les parois extérieures des bateaux), l'aquariophilie ou l'aquaculture. Ce fut par exemple le cas avec l'importation de l'huître du Pacifique, *Crassostrea gigas*, à la fin des années 1960. Il s'agissait de relancer l'activité ostréicole dans l'étang de Thau (à proximité de Sète), frappée par des épidémies virales. Mais finalement, l'huître japonaise a colonisé l'ensemble du bassin occidental de la Méditerranée et de l'Adriatique. Le fléau est le même en Atlantique où le bivalve prolifère et colonise une partie des côtes, y compris des parcs marins, jusque dans les fjords norvégiens. Issue d'élevage ou de pêche, c'est désormais la principale espèce vendue

Copyright © 2017 Editions Quae.

sur les marchés, la fameuse huître creuse. Sur certains sites méditerranéens et de la côte Atlantique, elle forme des récifs denses qui ont modifié l'habitat d'origine de façon spectaculaire. En mer des Wadden (Pays-Bas), affectée par la même invasion, on recense jusqu'à 1 500 huîtres *C. gigas* au mètre carré sur des bancs de moules colonisées.

Si l'aquaculture génère des introductions intentionnelles et parfois accidentelles, dans le cas des eaux de ballast, il s'agit d'un transport clandestin. La coque d'un navire contient un réservoir rempli de dizaines de milliers de mètres cubes d'eau de mer pour assurer l'équilibre du bateau. L'eau de mer est pompée ou relâchée en fonction du volume de marchandises transportées. Or, ces eaux contiennent plusieurs milliers de microbes, d'algues et d'animaux aquatiques qui voyagent sur les océans du monde avant d'être abandonnés dans un écosystème qui n'est pas le leur. Selon l'Organisation maritime internationale (OMI), les eaux de ballast sont responsables chaque jour du transfert de 7 000 à 10 000 espèces dans le monde ! Toutes ne survivent pas, toutes ne sont pas invasives mais *in fine*, presque 60 % des introductions d'espèces invasives sont liés à cette pratique. C'est le cas de l'étoile de mer *Asterias amurensis* transportée depuis le Pacifique Nord jusqu'au Sud de l'Australie. Elle est devenue une véritable calamité pour les environnements envahis. Des études estiment qu'elle est à l'origine de pertes économiques considérables puisqu'elle se nourrit de crustacés et mollusques comme, par exemple, les coquilles Saint-Jacques, les huîtres et les palourdes. L'animal fait partie des 100 espèces invasives considérées comme les pires au monde par un groupe d'experts de l'Union internationale pour la conservation de la nature (Invasive Species Specialist Group, ISSG). Heureusement, ces migrations clandestines devraient être endiguées à

Copyright © 2017 Editions Quae.

partir de septembre 2017 grâce à une convention obligeant les navires à traiter leurs eaux de ballast. Au menu : des traitements mécaniques (filtration, séparation), physiques (la stérilisation par l'ozone, les rayonnements ultraviolets, l'électrolyse ou la chaleur) ou l'introduction de produits chimiques (biocides). En attendant, Messieurs les navires, veuillez rejeter vos eaux à plus des 200 milles de nos précieuses côtes. Quant à l'OMI, elle a déjà un nouveau dossier dans son escarcelle : l'éradication du *biofouling* fixé sur les coques de bateaux.

La ratification de la Convention internationale sur les eaux de ballast peut sembler anecdotique mais elle marque l'aboutissement d'un siècle de recherches et au moins douze années de tractations. Il est difficile une fois les traités ratifiés, les mesures engagées et les droits acquis, de prendre la mesure du travail de fond que cela réclame en amont. Aussi, la prise de conscience que des menaces pèsent sur l'environnement marin est récente : la Convention des Nations unies sur le droit de la mer et des océans date de 1982 (entre en vigueur en 1994), la Convention sur la diversité biologique date de 1992 (entre en vigueur en 1993), le Protocole de Nagoya date de 2010 (entre en vigueur en 2014). Dépassant le cadre de la protection de la biodiversité, ce dernier porte sur l'accès aux ressources génétiques et au partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation. Autrement dit, il s'agit d'éviter toute forme de « biopiraterie » consistant à prélever des ressources, ou des connaissances traditionnelles associées, en un lieu pour les faire fructifier dans un autre, sans partage des bénéfices. Protéger les ressources, c'est aussi protéger les gens qui en vivent localement et anticiper les besoins des générations futures. Le Protocole de Nagoya pourrait toutefois rester une coquille vide si les autres réglementations n'emboîtent pas le pas :

Copyright © 2017 Editions Quae.

« Les accords de l'OMC concernant la propriété intellectuelle (TRIPS) n'obligent pas le dépositaire d'un brevet concernant une séquence génétique à divulguer le nom de l'espèce dont elle est issue ni sa provenance. Or, si on ne connaît pas l'origine géographique de ces ressources, il n'est pas possible d'en partager les avantages avec les pays d'où elles proviennent », souligne Sophie Arnaud-Haond, chercheur au laboratoire Halieutique Méditerranée de l'Ifremer de Sète qui a réalisé, en 2011, une étude sur les brevets enregistrés dans la base de données GenBank. La biologiste rappelle, par ailleurs, que ces réglementations s'appliquent uniquement dans les zones maritimes régies par les juridictions nationales des pays signataires (bande des 200 milles marins, soit 370 kilomètres).

Au-delà, dans les eaux internationales qui occupent 65 % des océans, c'est un peu le « Far West ». Du moins en ce qui concerne la biodiversité et son exploitation car des règles ont été établies par les organisations régionales de pêche pour cette activité et l'Autorité de fonds marins (AIFM) encadre une potentielle exploitation minière à venir (*voir « Les mines se vident, cap sur la mer !* »). La haute mer n'est couverte par aucun protocole ou traité sur la protection et l'exploitation des ressources génétiques, alors qu'on y effectue des bioprospections, voire une biopiraterie. Autour des sources hydrothermales ou aux pôles par exemple, cette bioprospection a permis de mettre au jour des molécules dont l'intérêt se révèle très lucratif. D'où l'idée de négocier dans le cadre de la Convention sur le droit de la mer un nouvel accord sur « la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine » en haute mer. Depuis 2016, diplomates et juristes sont en phase de pré-négociations afin de présenter des options pour trouver un accord régulant ce vaste territoire. Les biologistes, comme Sophie Arnaud-Haond, consultée dans le

Copyright © 2017 Editions Quae.

cadre de ces pré-négociations, donnent un éclairage particulier aux discussions : « Du fait de leur forte capacité à se disperser avec les masses d'eau, en particulier au stade larvaire, la plupart des espèces marines peuvent être collectées à différents moments de leur vie dans plusieurs zones économiques exclusives et en haute mer. Les compartiments géographiques définis par les sociétés à des fins de gouvernance n'ont pas de légitimité biologique. Une solution plus cohérente sur le plan biologique pourrait consister à considérer les ressources génétiques marines comme ayant une origine unique, l'environnement marin. » Une solution ambitieuse ayant pour corollaire d'admettre que les ressources génétiques marines soient partagées par tous. Serions-nous prêts pour une nouvelle forme de gouvernance ?

Copyright © 2017 Editions Quae.

5

PLUS BESOIN DE TERRE FERME !

L'analyse de données acquises durant 20 ans par sept satellites a permis à l'Ifremer de mettre en évidence l'intensification du trafic en mer. La densité de bateaux a quasiment quadruplé, excepté au large de la Somalie où la piraterie a coupé court à toute navigation. Dans l'océan Indien, la hausse du trafic est de l'ordre de 300 % ! Qu'il s'agisse de navires de commerce ou de tourisme, cette augmentation souligne une nette évolution dans notre rapport à la mer. Dans ces étendues liquides, on peut non seulement naviguer mais aussi, construire des habitations, des autoroutes, y déposer des câbles afin de former l'ossature d'une communication internationale et donner aux touristes l'occasion de vraiment prendre le large.

En 2050, vivrons-nous dans des bulles de verre sous la mer, sur des cités flottantes artificielles, dans des caissons immergés ? Nous serons alors 9 milliards sur une terre en partie inhospitalière. La conquête de l'espace rêve toujours d'une installation au milieu des étoiles, mais les étoiles de mer sont plus accessibles.

En 2050, prendrons-nous tous nos vacances dans des lieux extraordinaires sur des paquebots dignes d'un *Titanic* du futur ? Les chiffres du tourisme en mer explosent : croisière, *Whale Watching*, plongée… et nous

Copyright © 2017 Editions Quae.

vient l'envie de découvrir des territoires vierges et sauvages avec le confort et la garantie d'en sortir indemnes, c'est la démocratisation de l'exploration.

En 2050, aurons-nous toujours autant de produits importés de la mer ? Quelles seront les routes maritimes empruntées et celles qui seront délaissées ?

En 2050, les maisons, les voitures, et même les humains ne seront-ils pas programmés pour être connectés ? Avec les câblages sous-marins, l'océan sera au cœur de cette révolution en cours.

CONSTRUIRE VERT C'EST BIEN, BLEU C'EST ENCORE MIEUX !

« Croyez-vous qu'il existe des îles à naufragés, des îles spécialement créées pour qu'on y fasse correctement naufrage ? » La question que pose Jules Verne à travers l'un des personnages de *L'Île mystérieuse* en 1875 perd aujourd'hui son caractère fictif, voire utopique. Pour 2100, le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit une élévation de la mer entre 27 et 98 centimètres, selon l'optimisme du scénario. En Micronésie, au Bangladesh, dans les îles Marshall ou à Tuvalu, la question est devenue cruciale : où installer les futurs « naufragés climatiques » dont les territoires seront probablement submergés par les eaux ? Des géographes estiment qu'une migration sera engagée avant la fin du siècle à cause du stress hydrique provoqué par l'augmentation des températures et la chute des précipitations. Des géologues ont constaté qu'une urbanisation incontrôlée dans certaines villes côtières contribuait à leur affaissement. Ailleurs, la subsidence survient après un pompage massif des eaux souterraines. Ces causes anthropiques se mêlent aux causes naturelles et accroissent les risques liés

Copyright © 2017 Editions Quae.

à la hausse du niveau de la mer. Un État archipélagique parmi les plus menacés a déjà acheté des espaces chez son voisin : les Kiribati (océan Pacifique) ont acquis 2 400 hectares dans les îles Fidji pour reloger une partie de leurs 110 000 habitants. Aussi, pour éviter cette migration forcée vers des pays étrangers, des gouvernements visent des « îles refuges » encore inexistantes. Bientôt, une île artificielle flottante appelée *Fleur d'océan* s'ajoutera aux 1 300 îles naturelles qui composent les Maldives (océan Indien). Immense radeau fait de béton creux, la fleur est ancrée au fond de l'océan par des câbles et des pieux d'amarrage mais sa surface, flottante, peut s'adapter à la montée des eaux. Dans ce complexe en forme de fleur, les pétales sont recouverts d'une ribambelle de maisons et le bout de la tige est connecté à l'atoll où se trouve la capitale. Le gouvernement et une entreprise néerlandaise comptent engager quatre autres opérations similaires.

Les Pays-Bas sont les pionniers des ouvrages architecturaux visant à vivre sur la mer. Dans un pays où 35 % des terres sont sous le niveau de la mer, s'adapter aux inondations est une activité séculaire. Aujourd'hui, les polders gagnés sur la mer depuis le XVIIIe siècle accueillent 60 % de la population. Leur stratégie de combat offensif, basée sur des barrages et des digues, a progressivement fait place à une politique intégratrice de l'eau. À l'est d'Amsterdam, dans le quartier de Ijburg, on donne la touche finale à un damier d'îles artificielles construites sur l'eau par remblais successifs. Reliées entre elles par des routes et des ponts, ces îles accueilleront 45 000 habitants. En deux siècles, la France a gagné plus de 5 200 hectares sur la mer avec, parmi les dernières grandes exondations, l'aéroport de Nice. Vingt kilomètres à l'est, se trouve la Principauté de Monaco dont un quart du territoire est un espace grignoté sur la mer. Géographe au Centre d'écologie fonctionnelle

Copyright © 2017 Editions Quae.

et évolutive (Cefe) de l'université de Montpellier III, Sylvain Pioch participe aux réflexions préalables à une nouvelle extension du territoire monégasque prévue pour 2018 : « Les six hectares de l'extension constituée de méga-caissons immergés sont un laboratoire d'essais pour améliorer l'intégration de la presqu'île artificielle au milieu marin : bio-bétons, design des surfaces immergées. Pour la première fois, dans le cadre d'un projet opérationnel, vont être testés des matériaux et des architectures d'ouvrages dont une partie a été conçue pour favoriser la colonisation par la biodiversité marine. À terre, le béton est inerte à la vie mais en mer, il se tapisse d'une croûte biologique qui, outre l'intérêt écologique, peut le protéger de l'eau salée et le rendre plus durable ! L'objectif est donc de favoriser la colonisation des ouvrages en les transformant à l'échelle chimique (pH, bio-starters…), microscopique (porosité, rugosité…) et macroscopique (formes bio-mimant les habitats naturels). »

Dans un genre beaucoup plus spectaculaire, si vous n'avez pas déjà vu cet incroyable complexe de maisons, hôtels et plages privées rassemblés sous la forme d'un palmier dans le golfe Persique à Dubaï, allez le découvrir sur *Google*. Un petit paradis pour fortunés, voire une prison dorée, qui a ensuite fait émerger un second projet, *The World*. Dirigez-vous à l'Est, 55 méridiens plus loin et 15 parallèles au Sud : vous êtes dans la mer de Chine où sept îles artificielles sont en construction pour un public radicalement différent. Les prises de vue satellitaires vous projettent aussitôt dans l'imagerie d'une bataille navale : dans le port, des navires de grande taille ; sur une digue, une piste d'atterrissage ; dans un enclos, ce que le *think tank* américain Center for Strategic and International Studies (CSIS) suppose être des radars. Quelles que soient les intentions du gouvernement de Pékin, une chose a été

Copyright © 2017 Editions Quae.

démontrée : en déposant des millions de tonnes de sable sur des récifs immergés, il est possible de créer des îles artificielles en moins d'un an. Très décriés par les associations de protection de la nature, ces ouvrages engendrent une profonde perturbation des écosystèmes (*voir « Les mines se vident, cap sur la mer ! »*). Par ailleurs, ils sont tout aussi menacés par la montée des eaux que le continent !

C'est pourquoi de jeunes agences d'architecture placent désormais leurs espoirs dans des bâtiments flottants, voire des cités flottantes. Sur le lac IJ d'Amsterdam, des maisons sur barge se multiplient comme les poissons et les petits pains de Jésus. À Dubaï et à Miami, de petites îles privées flottantes, construites sur mesure, seront bientôt en vente. Aux Maldives, pour que la *Fleur d'océan* puisse devenir rentable, il a fallu en contrepartie laisser de la place à un hôtel 5 étoiles, un golf et des villas privées. Ces îles flottantes demeurent donc très chères et les constructions à destination des pays au faible produit intérieur brut (PIB) se comptent sur les doigts de la main. À Dhaka (Bangladesh), il y a *CityApps*, un conteneur flottant avec des postes Internet. Au Nigeria, c'est une école flottante avec une charpente en bois et des bidons en plastique en guise de flotteurs. Ce prisme de 10 mètres de haut et de 220 mètres carrés a été construit avec les matériaux locaux d'un bidonville à Lagos. Ventilation naturelle grâce à des murs à claire-voie, panneaux solaires et traitement des eaux usées ont fini par convaincre les plus récalcitrants des habitants. Pendant trois ans, les enfants ont passé leur récréation au rez-de-chaussée et suivi les cours aux deux étages supérieurs. Alors que l'architecte nigérian, Kunle Adeyemi recevait pour cet audacieux projet un *Lion d'argent* à la Biennale d'architecture de Venise en 2016, son ouvrage s'écroulait dix jours plus tard suite à des pluies diluviennes. L'école était vide depuis déjà trois mois

Copyright © 2017 Editions Quae.

pour réparation. Les architectures flottantes doivent donc encore trouver leur modèle en fonction des pays et de leurs ressources.

Il n'empêche, plus de la moitié de l'humanité vit à moins de 60 kilomètres d'un littoral, proportion qui devrait atteindre 75 % aux alentours de 2030. Les deux milliards d'âmes qui devraient naître d'ici 2050 pourraient s'agglutiner dans les 20 plus grandes mégapoles sur terre dont la moitié sont côtières. Parmi les plus peuplées des villes, Bombay (Inde), Dhaka (Bangladesh), Guangzhou et Shanghai (Chine), Miami et New York (États-Unis), Alexandrie (Égypte), Abidjan (Côte-d'Ivoire) ou encore Tokyo (Japon) font partie des vingt mégapoles les plus menacées par la montée des eaux. En France, depuis 1962, la population du littoral a augmenté de 41 % en métropole et a quasiment doublé (+ 90 %) dans les départements outre-mer. Aujourd'hui, le gouvernement avance dans ses textes la nécessité d'un « repli stratégique », autrement dit d'une relocalisation des activités en arrière du littoral. Dans les faits, cette approche ne trouve aucun écho alors que de nombreux rivages reculent. À Palavas-les-Flots, dans l'Hérault, ce sont 200 mètres de plage qui ont été grignotés en 150 ans. Entre 1954 et 2006, les côtes du Pays basque ont reculé tous les ans de 20 centimètres en moyenne. En Aquitaine, un immeuble de Soulac-sur-Mer menaçant de s'effondrer a été évacué en 2014.

En Asie, la vision diffère : plutôt que de reculer, on avance car la mer est un nouveau territoire à conquérir. Une compagnie d'infrastructures portuaires chinoises a commandé un projet de cité flottante de 10 kilomètres carrés, bâtie sur des caissons posés sur l'eau. En surface, des habitations, des espaces verts et un port de plaisance ; sous l'eau, des bulles de verre serviraient d'appartements, de cinémas et de boutiques. Autre concept, la *Lilypad*, une

Copyright © 2017 Editions Quae.

ville flottante aux allures de nénuphar pouvant accueillir 50 000 personnes. Ou encore, l'*Arbre des mers*, une haute structure pour bassin portuaire dans laquelle des terrasses végétalisées permettent d'accueillir la faune et la flore qui n'a plus d'espace en milieu urbain. Les plans des cabinets d'architectes font miroiter des îles et cités flottantes éco-responsables, zéro émission de carbone, sans danger, qui ne sont pas sans ressembler à *Utopie*, l'île de nulle part que le philosophe Thomas More décrivait dans son livre éponyme. Du livre à la réalité, l'histoire nous instruit des dérives potentielles… Et pourtant, l'expérimentation n'est-elle pas essentielle pour que l'humanité s'adapte, voire progresse ?

En marge de ce mouvement d'urbanisme flottant, des initiatives originales voient le jour. Des laboratoires scientifiques de surveillance et d'analyse de la mer qui sont autant d'héritages des premières expériences d'habitats sous-marins menées par le Commandant Cousteau durant les années soixante. La série des Précontinents de l'illustre officier de la Marine nationale commence avec un cylindre pouvant accueillir deux habitants, installé à 10 mètres de fond au large de Marseille. Insatiable, Cousteau construit ensuite une maison en forme d'étoile de mer, à la même profondeur, en mer Rouge. L'aventure se termine avec une sphère de 6 mètres de diamètre plongée à 110 mètres de fond au large de Nice. Dans la décennie qui suit, de nombreux programmes visent à développer l'habitat sous-marin. Mais les difficultés techniques, et surtout les coûts d'investissements, réfreinent toute ambition de s'installer sous la mer. Aujourd'hui, seuls des hôtels de luxe pourraient proposer ce genre d'aventure : *Jules Undersea Lodges* en Floride, ou encore *Hydropolis* (Dubaï) et *Water Discus Hotel* (aux Maldives) en cours de construction. Océanographe et architecte

Copyright © 2017 Editions Quae.

visionnaire, Jacques Rougerie a 30 années d'expérience dans l'habitat sous-marin. Aujourd'hui, il ne croit pas qu'une cité occupée par un million d'habitants s'érige au fond des mers, mais que l'Homme gagne sur l'eau des espaces avec des maisons à moitié immergées est, d'après lui, plus que jamais une voie d'avenir.

NEUF MILLIARDS DE TOURISTES EN MER

Qu'a bien pu penser la communauté inuit d'Ulukhartok en septembre 2016 lorsqu'elle a vu débarquer l'équivalent de quatre fois sa population dans son village canadien ? Dans tous les cas, il faudra qu'elle s'habitue à ce genre d'escale car d'autres paquebots de croisière suivront le *Serenity Crystal* à l'origine de ce voyage dans le mythique passage du nord-ouest qui relie l'océan Pacifique à l'Atlantique. Dans sa catégorie, c'est le premier à avoir emprunté le passage qui ne se découvre de sa couche de glace en été que depuis 2007. Avant lui, d'autres cargos et bateaux de plaisance ont traversé cette langue de mer dégelée mais aucun n'atteignait les dimensions du *Serenity Crystal* : 250 mètres de long, 13 ponts, 6 restaurants, un centre de *fitness*, un spa, un cinéma, plusieurs piscines…, avec à bord, plus de 1 000 clients et 600 membres d'équipage.

En 25 ans, le nombre de croisiéristes s'est multiplié par six, pour atteindre 24 millions en 2016. C'est un segment du tourisme de masse parmi les plus dynamiques au monde. Cet âge d'or s'étire depuis trente ans et l'avenir semble radieux vu l'engouement du marché asiatique pour les séjours en mer sur les paquebots sumo. Dernier-né des *serial bigger* : *Harmony of the Seas* peut héberger presque 8 000 personnes et compte à bord un amphithéâtre extérieur, une patinoire, des simulateurs de surf, un parc paysager, un mini-golf, un toboggan de plus

Copyright © 2017 Editions Quae.

de 40 mètres. Jusqu'à présent, l'essentiel des croisières avait pour destination les Caraïbes ou la Méditerranée mais de nouveaux horizons gagnent des passagers en mal d'aventures : les zones polaires. L'Antarctique est le fleuron des terres d'exception : sur ce continent de 14 millions de kilomètres carrés destiné à la recherche scientifique, le tourisme est accepté moyennant certaines conditions. Le bateau qui accoste ne doit pas avoir plus de 500 passagers, ces derniers doivent descendre sur la terre ferme par groupe de 100. Au final, cela permet tout de même à 40 000 personnes (selon une fourchette basse) de fouler l'Antarctique chaque été pour le plaisir de photographier un manchot. Le principal risque est l'introduction involontaire d'espèces non-autochtones. Très résistantes, les espèces exogènes ont tendance à remplacer les espèces locales au métabolisme moins actif. Le phénomène est bien connu sur l'archipel des Kerguelen où les rats, arrivés avec les bateaux des baleiniers au début du XXe siècle, sont devenus une espèce invasive. Pour endiguer leur prolifération, des chats ont été volontairement introduits en 1950. Malheureusement, les pétrels sont plus faciles à chasser que les rats… Les félins ont commencé à se multiplier et la population de pétrels a dramatiquement baissé. Ces derniers étant devenus trop rares, les chats se sont rabattus sur les lapins, autre espèce introduite depuis l'Afrique du Sud et responsable de la disparition des tapis d'azorelle qui fleurissaient avant eux sur l'île. S'il est peu courant que les touristes cachent des lapins dans leur bonnet, il est beaucoup plus probable que leurs vêtements contiennent des graines, pollen ou virus susceptibles de se propager dans ces territoires « vierges ». C'est pourquoi, les mesures de biosécurité consistent à changer de vêtements ou à les décontaminer avant de débarquer.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Dans l'univers des croisières, tout n'est pas rose. De nombreux ports se disputent les 300 paquebots qui voguent sur les mers et sont prêts à d'importantes transformations pour se plier aux dimensions des mastodontes. Avec des travaux d'extension dans son port, Marseille compte gagner des places dans le classement mondial des ports d'accueil pour croisiéristes. Même chose à Barcelone qui souhaite devenir leader des têtes de lignes en Europe (point de départ et d'arrivée pour les croisiéristes). Un second terminal a été construit sur le site de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe), un nouveau terminal de croisière dans la baie de Maimon (République Dominicaine). Pour certains riverains, cette frénésie semble démesurée et des critiques à l'encontre de l'impact environnemental de ces « villes flottantes » émergent. Les plus houleuses viennent de Venise, la cité emblématique des constructions sur pilotis. Une partie des habitants et l'Unesco réclament que la navigation soit interdite aux gros navires (paquebots de croisières et pétroliers) dans la lagune. Selon plusieurs études, leur passage déplace du sable et crée des vagues qui fragilisent les pilotis sur lesquels repose la ville. Les 520 escales annuelles dans la Cité des Doges lui rapportent 6 % de ses touristes. Menacée par l'Unesco d'être classée « patrimoine mondial en danger », au même titre que les sites antiques de la Syrie ou de la Libye, la ville s'est engagée en 2017 à limiter ce trafic maritime.

Côté pollution, les navires suivent la Convention Marpol élaborée dans le cadre de l'Organisation maritime internationale concernant les dégazages, les eaux usées, les ordures, les eaux de ballasts et la pollution de l'atmosphère. Cela n'empêche pas les associations comme France Nature Environnement ou l'ONG Transport et Environnement de dénoncer un bilan très négatif en termes d'émissions. Afin de casser leur image de pollueurs, mais aussi pour anticiper

Copyright © 2017 Editions Quae.

les évolutions de la réglementation et la diminution des ressources pétrolières, certaines compagnies ont entamé leur transition « écologique » avec des bateaux propulsés au gaz naturel liquéfié. Comparé au fioul marin traditionnellement utilisé (MGO), le gaz réduit les émissions d'oxyde de soufre, de dioxyde d'azote, de dioxyde de carbone et de particules fines de suie. Le contexte actuel laisse présager que les moteurs hybrides se développeront prochainement mais pour 2050, rien n'empêche d'espérer l'essor d'un combustible ou d'une énergie encore plus propre, voire d'un nouveau mode de propulsion (*voir « Les mines se vident, cap sur la mer ! »*).

Enfin, comment évoquer les croisières sans aborder les risques de naufrages ? Si le triste sort du *Titanic* ne semble pas être une éventualité des temps modernes — compte tenu des réglementations sur la coque des bateaux — d'autres facteurs peuvent être à l'origine d'un désastre. Les naufrages du *Costa Concordia* en 2012 (au large de l'Italie) et *l'Étoile de l'Orient* en 2015 (sur le fleuve Yangtsé, en Chine), sont là pour nous le rappeler. Aussi, les risques en termes de vie humaine s'accroissent avec la taille des navires et leurs populations. D'autre part, le sauvetage dans les nouvelles destinations semble bien compliqué. En Arctique, outre le manque de moyens et de concertation, les cartes sont trop imprécises : les fonds sont encore mal connus et la circulation des icebergs rend l'information maritime rapidement obsolète. En 2012, le *Marion Dufresne*, un navire océanographique qui ravitaille les îles sub-antarctiques depuis 17 ans, heurtait un haut-fond encore inconnu. L'avarie, survenue dans l'archipel de Crozet (Antarctique), n'a causé que des dégâts matériels : une entaille de 25 mètres à bâbord de la coque.

Clinquants et faramineux, les bateaux de croisière ne doivent pas occulter les autres facettes du tourisme mari-

Copyright © 2017 Editions Quae.

time. Les navires d'expédition, les voiliers, les petits yachts ou bateaux de plaisance contribuent également à augmenter le nombre de touristes des mers. Dernièrement, c'est le *Whale Watching* qui a fait un boom. Fini les musées où l'on voit au mur des planches de cétacés dessinés ou derrière une vitrine, leurs corps exposés. Fini les *Marine Lands* où l'on découvre les animaux à portée de main dans de gigantesques aquariums. Depuis les années 90, des agences proposent d'observer les mammifères marins d'un bateau dans leur milieu naturel. En Méditerranée, huit espèces communes de cétacés (grand dauphin, baleine à bec de Cuvier, *Ziphius*, rorqual, cachalot…) sont facilement et régulièrement observables. Le sanctuaire *Pelagos*, créé par la France, l'Italie et la Principauté de Monaco pour la protection des mammifères en Méditerranée, reconnaît que cette activité permet de sensibiliser le public, voire dans certains endroits du globe, de réduire la pression de la chasse à la baleine qui continue malgré l'existence d'un moratoire. Mais l'organisation affirme par ailleurs que, non encadré, le *Whale Watching* peut constituer une source de perturbations écologiques. C'est pourquoi le Sanctuaire, outre des mesures de protection (limitation de la vitesse des bateaux, système de détection…) a créé un label grâce auquel les touristes peuvent repérer les opérateurs qui se sont formés et respectent un code de bonne conduite pour préserver le cycle de vie des mammifères (pas de nage avec eux, pas de repérage aérien, observation éloignée, etc.).

Si l'on considère l'observation des cétacés comme le *must,* celle des autres animaux marins déclenche tout autant d'intérêt : le nourrissage de requins en pleine nature attire dans les eaux polynésiennes de plus en plus d'adeptes des frissons, avec pour répercussion une probable modification dans le comportement des squales ; en mer d'Iroise (Bretagne), plus d'une centaine de

Copyright © 2017 Editions Quae.

phoques ont été observés et enjouent les touristes. Même engouement dans la baie du Mont-Saint-Michel et dans la baie de Somme. Quant aux tortues, elles demeurent certainement les reptiles les plus recherchés de l'océan. En Guadeloupe, la récente réintroduction du lamantin, mammifère aquatique disparu des Antilles françaises depuis le XXe siècle, vise en partie une nouvelle forme d'écotourisme. Cette grosse vache de mer, environ 500 kilos de chair, se déplaçant lentement sous les eaux chaudes, pourrait être à l'origine du mythe des sirènes… En Floride, les plongeurs et les adeptes du *Snorkeling* (randonnées palmées) affluent dans les sites refuges tels que *Crystal River* ou *Homosassa River* pour voir l'étrange animal mais ce petit marché, souvent mal encadré, génère de mauvaises surprises. Les caresses incessantes et toujours plus nombreuses des humains perturbent les lamantins. Pire, les bateaux de plaisance trop rapides les mutilent et laissent chaque année une centaine de cadavres dans les eaux (sur une population comptant 6 250 spécimens). Dans la baie de Grand-cul-de-sac marin, en Guadeloupe, le projet de réintroduction du lamantin a été approuvé par la Ve Conférence des Parties du protocole SPAW (protocole qui protège les espaces et les espèces d'intérêt majeur pour la Caraïbe, 2000). Il s'agit d'engager une démarche collective pour le retour de cet animal emblématique de la culture et de l'imaginaire guadeloupéen. L'objectif d'un tourisme durable et raisonné se planifie et se structure sur le long terme en concertation avec les habitants qui deviennent alors les garants de la conservation des animaux.

Le tourisme est souvent confronté à un débat opposant la croissance économique à la protection des ressources. L'écotourisme, qui refuse la mise sous cloche de la nature comme son exploitation débridée, pourrait être une

Copyright © 2017 Editions Quae.

réponse. Peut-être aussi n'y a-t-il pas toujours de réponse. En plongeant palmés pour admirer la Grande barrière de corail en Australie, déjà menacée par le développement d'activités minières à proximité, les touristes contribuent par une action mécanique à sa disparition. En prenant l'avion ou des cargos de croisière pour s'y rendre, ils émettent des gaz à effet de serre qui renforcent par des réactions physico-chimiques le blanchiment de cet édifice naturel, prémisse d'une mort annoncée. À terre, l'industrie du tourisme cherche encore une voie raisonnable et durable pour se développer. Le contexte marin rend cette quête encore plus essentielle.

Ni tourisme ni activité professionnelle, la pêche de loisir draine également un certain nombre de bateaux sur l'eau. On pourrait penser que cette activité n'a qu'un impact minime comparé aux prélèvements très importants de la pêche au chalut. En réalité, elle représente 10 % de la production totale de la pêche en Méditerranée. Selon certaines études, il n'y aurait pas de différence statistique de taille, de densité ou de richesse des organismes entre les zones ouvertes (à la pêche et autres activités) et les aires marines protégées à usages multiples (où les pêches artisanales et de loisir sont autorisées). Seules les zones, où le prélèvement de ressources vivantes est strictement interdit, produisent des résultats écologiques intéressants dès à court terme. Mais ces zones appelées AMP-réserves intégrales ne couvrent que 10 % des aires marines protégées mondiales et seulement 0,1 % des océans de la planète (en 2010). Dans la grande majorité des océans, la pêche de loisir est donc une menace du fait du prélèvement des poissons, de l'ancrage des bateaux sur des habitats sensibles d'intérêt (herbiers de posidonie, coralligène) ou encore par l'introduction d'espèces exotiques (*via* utilisation d'appâts provenant d'autres zones géographiques).

Copyright © 2017 Editions Quae.

« AU COMMENCEMENT ÉTAIENT LES ÉPICES »

Par cette phrase, Stephan Zweig résume le prologue de sa magnifique biographie sur Magellan. Il y explique que : « Sans doute la hardiesse des idées de Colomb et de Magellan aurait suffi à enthousiasmer les rois et leurs conseillers ; mais jamais personne n'eût financé leurs projets, jamais les princes ni les spéculateurs ne leur eussent équipé une flotte si on n'avait eu en même temps la perspective de récupérer au centuple les dépenses. Derrière les héros de cette époque se cachent des forces agissantes, les commerçants. […] » C'est donc l'appétit grandissant de l'Europe pour les épices et l'incroyable marché qu'il génère qui aurait poussé les navires de Magellan jusqu'à la pointe sud du continent américain. Le génie du navigateur, la force du capitaine et la foi de l'explorateur ne sont rien sans la puissance du commerce. Cinq siècles plus tard, ce sont toujours les mêmes raisons qui poussent près de 50 000 navires en mer : des vraquiers chargés de matières premières (minerai de fer, charbon, céréales, phosphate naturel…), des pétroliers ou tankers, des porte-conteneurs et, dans une moindre mesure, les transporteurs de gaz, les chimiquiers, les ravitailleurs, les rouliers chargés de transborder d'autres véhicules (voitures, camions, etc.).

Avec plus de 80 % du commerce mondial passant par l'océan, on parle désormais d'autoroutes maritimes. Le café du matin, les habits du jour, le téléphone qui sonne, le lit replié, l'essence achetée, les épices saupoudrées… presque tout ce que nous consommons parcourt des milliers de kilomètres en mer avant de nous parvenir. Et le trafic ne cesse d'augmenter : 1 milliard de tonnes de marchandises en 1960, 2,5 milliards en 1970, 3,7 milliards en 1980, 4 milliards en 1990, 5,8 milliards en 2000 et 8,3 milliards en 2010. Aujourd'hui, vogue chaque année

Copyright © 2017 Editions Quae.

l'équivalent en marchandises de 1 500 pyramides de Khéops. Au niveau national, cela donne un maelström d'en moyenne un navire de commerce touchant un port français toutes les 6 minutes. Si les vraquiers sont les mieux représentés dans la flotte marchande (41 % du tonnage), suivi de près par les pétroliers (28 %), les porte-conteneurs (14 %) connaissent une expansion fulgurante. Les boîtes métalliques de 6 mètres sur 12 mètres sont devenues le symbole de la mondialisation maritime et de la division internationale du processus de production. Les porte-conteneurs ont diminué le coût du transport de façon record : pour acheminer un conteneur de Shanghai au Havre (8 700 kilomètres), il en coûte le même prix ou presque que pour aller du Havre à Paris en camion (200 kilomètres). Résultat : le coût du transport représente moins de 2 % du prix du produit vendu ! Environ 1,5 % pour un téléviseur, 0,3 % pour une bouteille de whisky, 1 % pour un kilo de café. La raison ? Essentiellement la taille des porte-conteneurs qui progresse de manière exponentielle par rapport au coût d'exploitation. La capacité de ces mammouths marins a plus que triplé en 30 ans tandis que le nombre d'employés restait sensiblement le même. Outre l'avantage économique, le bateau est 13 fois moins polluant que l'avion, 5 fois moins que le camion, 2 fois moins que le train. Toutefois, son développement excessif pose aussi problème.

En février 2014, au large de Brest, le *Svendborg Maerks* perdait 598 conteneurs dans le golfe de Gascogne. La moitié des boîtes était vide, l'autre pleine de marchandises sèches et de viandes réfrigérées. Le navire aurait été particulièrement chahuté par une météo extrême affichant des vents de force 10 et des vagues atteignant plus de 13 mètres. Mais un autre facteur aurait contribué à l'avarie : deux ans plus tôt, le *Svendborg Maersk* avait ajouté deux à trois

Copyright © 2017 Editions Quae.

niveaux de conteneurs supplémentaires en pontée afin d'augmenter sa capacité de 3 000 conteneurs standards. Dans le monde, 10 000 conteneurs seraient perdus chaque année en mer mais les estimations varient entre 5 000 et 15 000 selon les sources. En effet, la Convention Marpol oblige les capitaines de navire à déclarer les avaries qui touchent les navires mais cette procédure générique a ses limites et les incidents ne sont pas toujours bien relevés. Quel que soit le chiffre, il s'agit d'une goutte d'eau dans l'océan des millions de conteneurs transportés chaque année. Bien qu'ils soient peu nombreux, ces objets flottants représentent tout de même un risque pour la navigation. Durant le *Vendée Globe 2016* par exemple, pas moins de 5 skippers sur 29 ont dû abandonner la course après avoir percuté « un objet flottant non identifié ». Le Dunkerquois Thomas Ruyant, dont le bateau a été brisé en deux, affirmait : « Vu la violence extrême du choc, je pense que j'ai heurté un conteneur. » Lorsqu'ils ne flottent pas, les conteneurs coulent et, là encore, il n'y a aucun moyen de les détecter. Aux États-Unis, une équipe scientifique de l'Institut de recherche de Monterey Bay (MBARI) a étudié un conteneur sept ans après sa chute, par 1 300 mètres de fond. L'écosystème semble s'être adapté à cet intrus : des vers tubulaires, des escargots de mer et des coquilles Saint-Jacques ont colonisé les parois en métal. Pour autant, faut-il laisser aux générations de 2050 quelque 300 000 conteneurs abandonnés dans les océans ?

Au large, le porte-conteneurs n'est plus visible, peu importe qu'il soit gros ou petit, mais lorsqu'il s'approche des côtes, ses dimensions pharaoniques s'imposent aux ports dans lesquels il doit décharger sa marchandise. Aussi, les plus grands ports du monde, à Singapour, Shanghai, Rotterdam, etc. s'étendent sur terre et se développent sur mer. En Guyane française, faute d'espace, on planche sur

Copyright © 2017 Editions Quae.

un projet de plateforme offshore multi-usage (Pomu) comportant un hub de 15 hectares pour accueillir les porte-conteneurs et stocker leur chargement, un terminal pour pétroliers, une zone de carénage et chantier naval, un espace aquacole… Objectif : faire de la Guyane un véritable hub maritime pour le transport de conteneurs et les activités de production pétrolière. Si les tendances actuelles se poursuivent, les ports de demain seront de plus en plus grands, gagneront de l'espace sur la mer, voire se « délocaliseront » en mer. Les porte-conteneurs continueront de gonfler et prendront progressivement le pas sur les vraquiers et autres navires. D'après Clarkson Research Services, l'une des principales sociétés fournissant des données et analyses sur le transport maritime, deux scénarios se profilent pour 2066 : dans le premier, les échanges par voie maritime continuent de croître de manière exponentielle pour atteindre 46 milliards de tonnes de marchandises ; dans le second, la tendance au ralentissement dans les échanges, observée depuis 2000, se confirme et aboutit à un marché de 18 milliards de tonnes de marchandises. Toute la question est de savoir si la période de ralentissement que nous traversons depuis plus d'une décennie est structurelle ou conjoncturelle. En tous les cas, la mondialisation et les demandes croissantes des pays émergents feront au minimum doubler les volumes échangés actuellement (9 milliards de tonnes).

Quels que soient les scénarios d'avenir, l'empreinte carbone du transport maritime risque de grimper. Dans un contexte où chaque Nation tente de réduire ses émissions de gaz à effet de serre par un durcissement de la réglementation, des ruptures technologiques, ou un changement de paradigme, cela fait tache d'huile. D'autant plus qu'en 2016, l'Organisme maritime international (OMI) a repoussé à 2023 l'obligation d'engager les

Copyright © 2017 Editions Quae.

mesures nécessaires pour réduire ces émissions. Jusqu'à présent, les accords internationaux pour limiter le réchauffement climatique — y compris ceux de la COP21 à Paris — occultent l'industrie du transport maritime. Pourtant, ce secteur contribue à 3, voire 4 %, des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, soit l'équivalent de ce que produit un pays comme l'Allemagne. Il pèse pour 90 % des émissions de dioxyde de soufre provenant des transports. Compte tenu du tonnage transporté, on peut considérer que ce mode de transport est peu polluant mais dans l'absolu, il demeure polluant. Conscients qu'une nouvelle façon d'avancer doit émerger, des esprits éclairés proposent de redéployer les voiles. À Arcachon, l'ancien skipper Yves Parlier (vainqueur de la *Route du Rhum* en 1994), a inventé un système de cerf-volant permettant de tracter la proue d'un bateau et d'économiser 20 % de carburant, soit 20 000 litres par jour pour un cargo moyen. Très simple, le principe qui vient tout droit de la technologie du *kite-surf* pourrait être adapté à n'importe quel bateau, cargo, yacht, ferry. Les navires hybrides (vent-hydrocarbures) ont convaincu plusieurs sociétés dont les projets sont en cours de développement (TOWT, Zéphyr…). Avec pour objectif une réduction de 90 % des émissions de gaz à effet de serre, Neoline est l'un des plus ambitieux. Porté par un armateur français, ce roulier de 120 mètres pourrait transporter 5 300 tonnes de marchandises malgré la présence de gréements. Outre la propulsion vélique, la réduction d'émissions s'opère aussi grâce à une optimisation globale du navire et de son fonctionnement en choisissant par exemple de réduire le nombre d'escale ou la vitesse commerciale. En abaissant de quelques nœuds la vitesse, on peut diminuer de 50 % les rejets soufrés. La perspective de ralentir ne semble pas rédhibitoire car les armateurs comptent davantage sur la

Copyright © 2017 Editions Quae.

ponctualité du navire que sur sa rapidité. Or, la fiabilité des délais peut désormais être assurée grâce aux données météorologiques ultra-précises. Il existe des logiciels de routage qui intègrent non seulement les éléments météorologiques mais aussi les courants marins. Contre toute attente, les routes géographiquement les plus courtes ne sont pas forcément les plus rapides! Les grands courants comme le *Gulf Stream* ou le *Kuroshio* jouent de manière conséquente sur l'allure d'un navire. Grâce aux progrès des nouvelles technologies, il est possible de faire de ces courants des alliés dans la bonne marche d'un bateau. Alors que le monde s'engage de plus en plus dans des activités dé-carbonées, le transport maritime prépare, lui aussi, sa mutation. Demain, les océans seront peut-être à nouveau peuplés de voiliers.

À moins que le monde dé-carboné se réoriente radicalement avec des productions (re)localisées façon « Made in chez nous ». À moins que la société repousse le schéma actuel où le lin produit en France est envoyé en Chine pour revenir sous forme de chemise, où les poissons pêchés en Écosse reviennent sous forme de bâtonnets tout prêts. À moins que les nouvelles technologies comme l'imprimante 3D facilitent l'indépendance vis-à-vis de pays tiers dont l'avantage d'une main-d'œuvre à faible coût devient de moins en moins probant. En Occident, ne sommes-nous pas en train d'assister à un effondrement de la mondialisation? Dans ce cas, il faudra tourner une sacrée page de l'histoire, celle où tout commençait… avec les épices.

UNE TOILE SOUS-MARINE QUI VAUT DE L'OR

L'affaire éclate le 6 juin 2013 : un jeune Américain fait des révélations fracassantes et top-secrètes sur l'Agence de sécurité nationale américaine (NSA) dans le quotidien

Copyright © 2017 Editions Quae.

The Guardian. Vous l'aurez deviné, il s'agit d'Edward Snowden, l'ancien consultant des renseignements américains (CIA) qui a révélé comment la NSA surveillait les télécommunications du monde entier. Parmi les moyens employés, Edward Snowden décrit l'interception des données directement à la source : *via* les câbles sous-marins. Nul besoin de mettre sur écoute des téléphones, de pirater des ordinateurs ou d'accéder aux informations *via* des logiciels et des serveurs, il suffit d'analyser les données dans les sites de réception des câbles sous-marins.

Plus de 95 % de nos communications intercontinentales sont véhiculées par les océans ! Une conversation téléphonique, un échange d'*email*, une flânerie sur les réseaux sociaux, mais aussi les opérations boursières, les flux d'informations entre administrations et, de manière générale, toute notre société numérique repose sur des câbles parfois pas plus épais qu'un tuyau d'arrosage. Déposés sur le fond marin ou ensouillés à quelques mètres sous le sédiment, plus d'un million de kilomètres de câbles sont déployés entre les continents ou serpentent le long des côtes. Au point de départ, l'information est découpée en paquets numérotés qui transitent par différentes routes numériques en fonction de l'encombrement du réseau. À l'arrivée, les morceaux sont recollés selon la numérotation initiale. Avec un temps de transmission de l'ordre de 40 millisecondes contre 540 millisecondes par voie satellitaire, le câble sous-marin réduit le temps de téléchargement de 90 %. La course est inégale : avec un satellite, l'information doit faire l'aller-retour jusqu'à l'orbite stationnaire (36 000 kilomètres d'altitude) alors qu'en mer, le plus long câble existant se déroule sur 40 000 kilomètres). Mis en service en 2000, le *Sea-Me-We* 3 relie 92 opérateurs internationaux, 33 pays sur quatre conti-

Copyright © 2017 Editions Quae.

nents et compte 39 points d'atterrissement. Sa capacité a été multipliée par 260 depuis son installation !

La pose de câbles sous-marins est une activité bien maîtrisée. Les premiers essais datent de 1838, il s'agissait alors de câbles en caoutchouc. Vingt ans plus tard, 4 200 kilomètres de câbles télégraphiques relient, pour la première fois, les deux continents qui entourent l'Atlantique. En 1950, les premiers câbles téléphoniques voient la mer. Depuis les années 90, un fil de verre fin comme un cheveu a permis de décupler les capacités de débit mais ce n'est qu'avec le boom d'Internet que le marché des câbles sous-marins a explosé. Aujourd'hui, on compte près de 300 câbles de fibres optiques sur la partie bleue du globe. À proximité des côtes, là où le passage de chaluts et le mouillage d'une ancre pourraient les endommager, ils sont enterrés à l'aide d'un robot déployé depuis le navire-câblier. À plus de 1 500 mètres de profondeur, on les dépose sur le fond. Les engins de navigation constituent la principale source de sectionnement des câbles. La deuxième est liée aux évènements naturels tels que les avalanches sous-marines ou les séismes. Enfin, les morsures de requins n'expliqueraient que 1 % des dégâts enregistrés. La faiblesse de ce chiffre n'a pas empêché *Google* de renforcer tous ses serpents de mer d'un gilet pare-balles en Kevlar en 2012. Cela doit tout de même coûter moins cher à l'opérateur que de voir des millions d'usagers coupés d'Internet pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, selon la difficulté d'accès du site où la réparation est nécessaire.

Dernier risque, mais pas des moindres : le sabotage ou les guerres. Pendant la Guerre Froide, 12 câbles transatlantiques avaient été sectionnés par les navires soviétiques. Rien de plus facile pour isoler une zone du reste du monde. Il faudra attendre 50 ans après l'embargo imposé à Cuba

Copyright © 2017 Editions Quae.

pour qu'une connexion câblée relie La Havane. Ainsi, l'envie de se soustraire au monopole des grandes Nations incite certaines régions à tirer leurs propres câbles. Le Royaume-Uni, en contact avec 49 des 265 câbles sous-marins, assure la quasi-totalité des échanges entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Plus généralement, le Royaume-Uni et les États-Unis sont en mesure de lire un quart des échanges transatlantiques. La question est encore plus tendue dans les zones très peu équipées comme l'Amérique du Sud, l'Afrique ou l'Antarctique. Pour toutes ces raisons, il y a lieu de croire que les poses de câbles sous-marins augmenteront à l'avenir. « Le développement du *Cloud Computing*, le stockage de données clients, comptables ou financières, pourraient accélérer ce mouvement. Si de nouveaux systèmes de production s'établissent comme l'impression 3D, nous aurons besoin d'échanger énormément de données numériques puisque le mode d'emploi de ces machines se présente sous la forme de fichiers échangés sur Internet. Tous ces facteurs pointent vers une tendance commune au développement des câbles sous-marins », souligne Cyrille P. Coutansais, directeur de recherches au Centre d'études stratégiques de la Marine (CESM).

Copyright © 2017 Editions Quae.

6

LES MINES SE VIDENT, CAP SUR LA MER !

Toutes les analyses convergent : nous assistons à une mutation des marchés mondiaux des matières premières. Depuis quelques années, des tensions d'approvisionnement se portent sur les métaux de base (cuivre, zinc, plomb…) dont les gisements à terre s'épuisent. Désormais, le monde traverse un scénario similaire pour les métaux rares (terres rares, indium, platinoïdes, gallium…), parfois qualifiés de stratégiques, du fait de leur utilisation croissante dans les nouvelles technologies (électronique, applications militaires, énergies propres…). Outre les métaux, le sable, ciment de nos bâtiments, se raréfie à terre alors que le secteur de la construction bat son plein. Quant aux hydrocarbures (gaz et pétrole), l'équation est simple : la demande explose mais la production est vouée à stagner, voire diminuer.

Avec une tendance de fond à l'envolée du cours de ces matières premières et la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement, les États intensifient la recherche de nouveaux gisements à terre et en mer. En effet, l'océan n'est pas qu'une grande soupe de poissons, de méduses et de ressources biologiques, ses fonds ont, eux-aussi, d'autres atouts. Sous moins de 200 mètres d'eau, proche des côtes, les hommes draguent le sol pour récupérer le

Copyright © 2017 Editions Quae.

sable sans lequel nos constructions n'existeraient pas. Entre 500 et 2 000 mètres, ils extraient plus du tiers du pétrole consommé sur terre et un peu moins du tiers du gaz. Au-delà de 2 000 mètres de profondeur, que peut-on bien trouver ? Pas grand-chose pensait-on jusqu'à la fin des années 70, période où de nombreuses campagnes scientifiques sont menées par la France notamment. Ces recherches ont permis d'identifier la présence de minéraux et de ressources énergétiques potentielles (hydrates de gaz et hydrogène). Depuis leur découverte jusqu'à leur exploration, dans les années 2010, tout laisse penser que la prochaine phase pour les minéraux des profondeurs sera celle de l'exploitation. Cela n'est pas sans poser des problèmes de souveraineté et de respect de l'environnement.

LA RUÉE VERS LE SABLE

En tant qu'habitant de l'Hexagone, on vous considère comme un consommateur de 5,5 tonnes de sable par an. Ce n'est peut-être pas votre cas personnel, mais la société française dans son ensemble utilise chaque année 400 millions de tonnes de sable. Nos maisons individuelles nécessitent 200 tonnes de granulats, chaque kilomètre d'autoroute près de 30 000 tonnes, le Stade de France 250 000 tonnes et la médaille d'or est remportée par les centrales nucléaires, 12 millions de tonnes ! Après l'eau, le sable est la deuxième ressource naturelle la plus utilisée dans le monde. Selon les estimations, 15 milliards de tonnes de granulats disparaissent de la nature chaque année. Avec des besoins mondiaux croissants, on s'achemine inexorablement vers une explosion de la demande. Or, le sable est une ressource limitée et non renouvelable.

Copyright © 2017 Editions Quae.

L'essentiel des granulats utilisés en France provient des carrières : tout commence par un abattage à l'explosif de massifs montagneux ou vallées fluviales dont les roches sont ensuite triturées et broyées jusqu'à l'obtention de granulats. À la sortie des carrières, les matériaux siliceux servent essentiellement à la construction dans le bâtiment (béton, pierre, chaux, verre…) et la voirie (routes, ballasts…). Quant aux sédiments calcaires, ils sont utilisés pour recharger les plages en sable ou comme amendement sur les terres agricoles. Actuellement, seulement 2 % des granulats siliceux et calcaires proviennent des fonds marins, soit 6 millions de tonnes extraites d'une vingtaine de sites dotés d'un titre minier en cours (concession, permis exclusif de recherche, permis d'exploitation) au large des côtes métropolitaines (dans la Manche et l'Atlantique) et un en Guadeloupe. Toutefois, de nombreux dossiers sont en cours d'instruction et devraient augmenter cette production à l'avenir.

Roulés par les vagues, les grains marins de forte densité auraient toutes les qualités pour rendre le béton résistant. L'opposé de ceux du désert dont on ne peut faire que des châteaux en Espagne. Ces derniers, longtemps lissés par l'usure du courant éolien, deviennent trop fins et trop ronds pour le bâtiment. Quant aux granulats concassés des carrières, ils sont trop angulaires pour les bétons techniques modernes. On continue de les employer moyennant l'ajout d'adjuvants dans la pâte à béton afin de la rendre maniable. Mais les industriels deviennent de plus en plus réticents car les changements de formulation introduisent des étapes supplémentaires dans le procédé de fabrication et, *in fine*, cela augmente leurs coûts. Même vice de forme pour les granulats tirés du recyclage d'anciens bétons (6 % de la production en France) qui sont comme des boules à facettes trop saillantes. Cet argument

Copyright © 2017 Editions Quae.

en cache peut-être un autre : les bétons recyclés ont la mauvaise image de rogatons dont personne ne veut. Les problèmes concernant la qualité des sables ne sont pas la principale raison qui pousse les industriels vers la mer. La raréfaction des carrières à terre est un motif bien plus contraignant. À cela deux raisons, la ressource diminue et le territoire est davantage réglementé par le développement de zones urbanisées, cultivées ou protégées. Probable aussi que le phénomène *Nimby* ralentit les élans des miniers. Le *Nimby* est le prolongement d'une tendance qu'ont les humains à s'émouvoir davantage de ce qui se passe près de chez eux qu'à l'autre bout de la planète : *Not in my backyard* (pas dans mon jardin), autrement dit, des carrières pourquoi pas mais pas à proximité de ma maison !

Pour les Bretons, la mer n'est pas un territoire étranger. Ainsi, depuis 2012, ils se sont fortement mobilisés à Lannion contre l'extraction du sable coquillier. Leur colère est motivée par la crainte de voir l'écosystème perturbé par le panache de turbidité que va générer l'activité minière et la destruction de la dune sous-marine, habitat de nombreuses espèces. En mer, l'extraction s'opère *via* une élinde, sorte de tuyau d'aspirateur géant qui engloutit les sédiments et les rejette sur le cargo sablier. Sur les photos prises d'avion, on voit très clairement un immense nuage turbide dans le sillage de ces navires-aspirateurs. Les associations locales s'interrogent sur la possibilité de préserver les deux zones classées *Natura 2000* situées à moins d'un kilomètre. Les particules fines mises en suspension peuvent retomber en pluie sur les fonds rocheux et étouffer la faune qui s'y est fixée : gorgones, éponges, anémones… Les études ont montré que ces particules (matières organiques, argiles…) peuvent s'éloigner de 3,5 kilomètres de leur

Copyright © 2017 Editions Quae.

zone de mise en suspension. Cela dépend, bien sûr, de l'hydrodynamisme de la zone. Cette turbidité nuit aussi à l'activité de la photosynthèse et génère une baisse du phytoplancton, base de la chaîne alimentaire. De même, les changements de courants induits par l'importante modification des fonds pourraient transformer le trait de côte. Déjà observées sur d'autres sites, ces modifications sont encore mal maîtrisées. Outre l'impact environnemental, les riverains s'inquiètent des répercussions économiques d'un effondrement de la biodiversité. Les professionnels du tourisme, mais également les pêcheurs, savent que la dune sous-marine peut servir de frayères aux poissons : poissons plats comme le turbot et la barbue, mais également lieu jaune et bar. Sans compter que ces dunes abritent des lançons, petits poissons fusiformes servant de nourriture aux oiseaux marins que les touristes viennent admirer sur la réserve des Sept-Îles.

Côté exploitants, on affirme que les sables coquilliers n'ont pas leur pareil pour l'amendement des cultures maraîchères. Jusqu'en 2013, on utilisait du maërl, un amas de sable, de débris coquilliers et d'algues rouges qui sécrètent un squelette calcaire. Depuis l'Antiquité, les Bretons épandent ces algues pour leur capacité à corriger l'acidité des sols mais aussi parce qu'elles sont riches en magnésium et oligoélements. Malheureusement, ce « corail breton » ne pousse que d'un millimètre par an et seule la couche superficielle des bancs de maërl est vivante. Pas de quoi résister au dragage intensif des engins modernes. En réalisant que ce milieu ne parvenait plus à se reconstituer naturellement alors qu'il sert d'abri à plus de 650 espèces animales dont certaines sont commercialisées comme la coquille Saint-Jacques, la palourde ou le turbot, l'État a interdit son exploitation et le protège désormais. Les industriels se sont donc rabattus sur les sables coquilliers

Copyright © 2017 Editions Quae.

de la mer depuis 2013. Les associations suggèrent de se tourner vers des espèces envahissantes comme la crépidule (mollusque marin venu d'Amérique du Nord dont les coquilles s'encastrent les unes sur les autres pour former des colonies) ou la tangue, sédiment déposé dans les zones de vasières comme dans la baie du Mont-Saint-Michel. Mais ces alternatives ne satisfont pas les industriels. Quant à l'exploitation au large, elle est trop coûteuse, affirment-ils.

Les sables siliceux de mer à destination du bâtiment sont également convoités. En Charente-Maritime, face au petit village ultra-touristique de La Palmyre, une demande d'extraction a été déposée et soulève une vague d'émoi jusqu'à l'embouchure de la Gironde, à Royan. De fait, on assiste à une multiplication des demandes et des contestations. Une situation toutefois idyllique en comparaison de ce que subissent certaines côtes et îles des pays émergents. À Singapour par exemple, la ville a gagné 20 % de sa surface en 40 ans au détriment d'une vingtaine d'îles indonésiennes disparues de la surface du globe. Depuis 2000, l'Indonésie ayant interdit l'exportation de son sable, les bâtisseurs de l'État de Singapour profiteraient d'une importation du Vietnam et Cambodge. Quant à l'Indonésie, elle tente d'ériger un immense mur de sable pour protéger sa capitale des flots marins. Rappelez-vous du cas bien connu de Venise qui s'enfonce dans l'Adriatique de 2 millimètres par an. Une goutte d'eau dans l'océan comparé à celui de Jakarta qui perd chaque année 25 centimètres ! Le mur salvateur aurait pour forme celle de *Garuda*, un oiseau mythique de la religion hindoue qui est du reste le symbole national. Des problèmes de corruption ont sclérosé le projet qui n'est pas abandonné pour autant. Du côté de l'Afrique, on peut citer le Maroc où des centaines de personnes ont été arrêtées pour le pillage

Copyright © 2017 Editions Quae.

illicite d'oueds et de plages disparues en quelques nuits. Le documentaire brûlot *Le sable: enquête sur une disparition* de Denis Delestrac montre des familles exploitées portant à dos d'homme ou d'ânes des paniers de sable sur des kilomètres. Étrange vision: on y voit les plages de l'Afrique se vider pour bâtir tandis que, de l'autre côté des tropiques, on prélève le sable des fonds océaniques pour engraisser nos plages. Qu'en sera-t-il en 2050? Le sujet est trop récent pour que des études prospectives soient engagées. Trop peu de chiffres et de données nous permettent d'établir un bilan clair de la situation. On peut tout de même citer parmi les bouées de sauvetage envisageables celle de trouver une alternative aux bétons ou accepter d'utiliser des matériaux de construction plus traditionnels (bois, paille, carton, pisé…).

Si le sable a fait couler beaucoup d'encre depuis cinq ans, ce n'est pas la seule ressource minérale marine déjà exploitée ou en cours de l'être. Les placers, par exemple, sont des accumulations de minéraux originaires du plateau continental, déposées en milieu marin par l'altération des ans. Ces dépôts, très nombreux, sont exploités dans des zones bien circonscrites avec des objectifs précis: pour l'étain (7 % de la production mondiale), l'or, le platine, le titane, le chrome, le zirconium et les terres rares. La Malaisie, premier producteur mondial d'étain, extrait 30 % de sa production des placers sous-marins. En Thaïlande et en Indonésie, 50 % de la production d'étain proviennent de l'océan. Au large de la Namibie, par 300 mètres de fond, mais également en Afrique du Sud, des exploitations de phosphate sont envisagées (qui sert ensuite d'engrais). La plus ancienne et la plus courante des exploitations est celle des sels marins. Le magnésium, le brome et le chlorure de sodium extraits de l'eau de mer servent à de multiples usages industriels et civils. Et le plus

Copyright © 2017 Editions Quae.

noble des minéraux, pourtant à l'origine de bien des scandales, est lui aussi exploité en mer, au large de la Namibie : c'est l'histoire du diamant.

LES MINÉRAUX TANT CONVOITÉS

Blanc exceptionnel, blanc extra, blanc nuancé, légèrement teinté… les mots manquent de précision pour refléter la variété de couleurs des diamants. L'industrie diamantifère s'appuie sur une échelle des couleurs qui commence à la lettre D, correspondant au diamant incolore le plus rare et le plus désirable, jusqu'à la lettre Z qui correspond au diamant jaune clair ou brun. En 2015, plus d'un million de carats ont été ramassés à plus de 100 mètres de profondeur dans le bleu de l'Atlantique, au large de la Namibie. Dans la région, c'est la moitié de ce que produit De Beers, le leader mondial de l'industrie diamantifère et unique exploitant dans le domaine sous-marin depuis dix ans. Les précieux cristaux sont dragués à l'embouchure du fleuve Orange où ils ont été charriés puis déposés par l'eau douce. Persuadé que l'avenir est en mer, le diamantaire a récemment acquis un cinquième bateau pour renforcer sa flotte destinée à l'exploitation sous-marine. Aujourd'hui, 150 ans d'expérience lui permettent d'affirmer que les mines terrestres se vident. Un constat que partage l'industrie minière de métaux moins précieux mais non moins stratégiques : le terbium utilisé dans les ampoules basse consommation, le cérium dans les pots catalytiques, le tantale dans les téléphones portables, l'indium dans les écrans plats… Sans oublier les métaux de base, servant notamment dans la construction (aérospatiale, aviation), comme le cuivre, le manganèse, le plomb, le cobalt ou le zinc, qui fondent sur terre comme neige au soleil : leur concentration dans les

Copyright © 2017 Editions Quae.

minerais exploités diminue progressivement. Ainsi, la teneur en cuivre d'une mine était d'environ 5 % au début du XXe siècle, contre 0,5 % actuellement.

Les nouvelles technologies sont particulièrement gourmandes en métaux de type « terres rares ». Il y avait 10 métaux dans une puce électronique en 1980, il y en a aujourd'hui 60 ! Certains aimants permanents d'éoliennes offshore contiennent jusqu'à 600 kilos de néodyme, quant aux véhicules électriques, ils en possèdent parfois 70 kilos dans leur moteur. Et à plus longue échéance, il faut penser aux besoins de la supraconductivité et de la réfrigération magnétique. Tout un pan de l'économie mondiale en gestation, transports et énergie compris, s'appuie sur ces métaux dont seuls quelques pays détiennent les clés de la production. Ainsi, la Chine assure 95 % du marché des terres rares. Le zinc est principalement produit en Chine et en Australie avec, selon certains analystes, une date d'épuisement prévue en 2025. Le cuivre, dont les principaux gisements sont aux États-Unis, au Pérou et en Australie, aurait pour date d'épuisement 2039. Si ces dates fluctuent en fonction du cours des métaux, le constat est unanime : la diminution des concentrations dans les stocks terrestres se double d'une augmentation de la demande et d'une dépendance vis-à-vis des pays exportateurs. Conscients de la fragilité de cette future économie et de la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement, les États ont décidé d'explorer leurs potentiels géologiques côté mer. Depuis déjà plusieurs décennies, des campagnes scientifiques ont permis d'identifier sous l'eau des formations fortement concentrées en métaux parmi lesquelles trois se distinguent par leur importance : les encroûtements de manganèse, les sulfures hydrothermaux et les nodules polymétalliques.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Imaginez une truffe de la grosseur d'une belle pomme de terre et vous avez en tête l'image d'un nodule polymétallique. Ces roches sont composées d'eau à 40 % et de poussières d'origine continentale mélangées à des squelettes d'organismes planctoniques qui se sont accumulés au compte-gouttes de l'échelle géologique : 5 à 10 millimètres par million d'années. Dans leur réseau cristallin à base de manganèse et de fer, on trouve quelques métaux rares mais surtout du nickel, du cuivre et du cobalt dans des proportions pouvant être équivalentes ou supérieures à celles des gisements terrestres. Avec 34 milliards de tonnes de nodules, la zone de Clarion-Clipperton, dans le Pacifique Nord, serait l'une des plus abondantes au monde. Selon l'Ifremer, elle représenterait 6 000 fois plus de thallium, trois fois plus de cobalt et plus de manganèse et de nickel que la totalité des ressources avérées hors des océans ! Découvrant l'intérêt minier des nodules, le président américain Johnson ne s'était pas trompé en 1966 lorsqu'il demanda que les grands fonds soient déclarés patrimoine commun de l'humanité. Cette proposition fut transformée en résolution en 1970 par l'assemblée générale des Nations unies.

Mais revenons au XXIe siècle où les nodules attendent d'être cueillis au fond des océans sur des étendues de plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres carrés, de par le monde. Cette vastitude est précisément l'un des problèmes : comment envisager une récolte sur des zones aussi larges ? Ajoutons à cela une deuxième dimension : les nodules sont particulièrement abondants et concentrés en métaux sur les plaines abyssales, au-delà de 4 000 mètres de profondeur. Un peu loin pour aller faire cueillette quand les gisements terrestres n'ont pas donné leur dernier mot. D'autant qu'en guise de cueillette, se présente comme solution le raclage des fonds marins. Beaucoup

Copyright © 2017 Editions Quae.

moins sympathique comme perspective! De récentes observations ont montré que 26 ans après le passage d'une drague à nodules dans la région de Clarion-Clipperton, la vie n'avait toujours pas repris. Avec des températures très basses et peu de nutriments disponibles, les rythmes biologiques sont considérablement ralentis. Aussi, malgré une connaissance scientifique assez précise des réserves, aucune société n'envisage pour l'heure de les exploiter. À moins que les réserves minérales terrestres ne s'épuisent brusquement, les champs des nodules peuvent continuer de pousser encore quelques années.

Changement de paysage: les encroûtements de manganèse se situent sur des protubérances, monts sous-marins, anciens volcans ou autres élévations bathymétriques situées entre 400 et 4 000 mètres de profondeur. Sur des zones occupant presque 2 % de la surface des océans, ils forment une couverture pouvant atteindre 25 centimètres d'épaisseur. La genèse des encroûtements se fait par précipitation des métaux à partir de l'eau de mer (hydrogénèse). Leur composition est bien documentée: essentiellement du fer et du manganèse mais ils se distinguent comme étant la plus riche source de cobalt sur terre. Le Pacifique contiendrait plusieurs milliards de tonnes de minerai, en particulier en Polynésie française. Malgré leur concentration en métal, ces ressources ne semblent pas exploitables avant plusieurs décennies: il n'existe ni technologie ni démonstrateur permettant de savoir comment séparer les croûtes de leur substrat solide et concasser ces tapis de roches. Sur le plan économique, il faudrait déterminer les zones les plus favorables à l'exploitation, et en particulier, sonder l'épaisseur des encroûtements qui peut varier de 2 à 25 centimètres. Aussi leur intérêt passe-t-il au second rang face à l'importance accordée à la prospection de sulfures hydrothermaux.

Copyright © 2017 Editions Quae.

C'est la seule ressource minérale marine dont l'exploitation soit imminente. Dans des sulfures hydrothermaux au large de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, l'entreprise canadienne Nautilus Minerals travaille depuis 10 ans sur un gisement de cuivre et d'or deux fois plus concentré que sur terre. Pour son exploitation, prévue en 2018, Nautilus Minerals a développé des engins relativement proches de ceux utilisés pour l'exploitation minière terrestre : des engins fraiseurs pour détacher le minerai, un collecteur, un système de pompage et de remontée du minerai qui sera essoré sur le navire avant d'être transporté à terre pour l'extraction des métaux. Toutes les opérations seront exécutées par des machines et des robots installés à 1 700 mètres de profondeur. Ils seront raccordés par de longs câbles et téléopérés depuis un navire en surface, selon le modèle des exploitations pétrolières offshore qui ont démarré il y a un demi-siècle.

Les sulfures hydrothermaux ont été découverts en 1978 grâce à une série de campagnes scientifiques franco-américaines qui visaient à mieux comprendre la tectonique des plaques. « Avec les Américains, la France était la seule à posséder la technologie des sous-marins appropriée aux recherches par 2 500 mètres de profondeur, se rappelle Yves Fouquet, responsable du laboratoire Géochimie et métallogénie de l'Ifremer, Centre Bretagne, qui a participé à 37 expéditions en mer. « C'est grâce aux deux submersibles habités *Cyana* et *Alvin* que nous avons pu échantillonner et remonter un dépôt hydrothermal. Cette découverte nous a donné l'occasion d'observer au plus près un site actif. Depuis, le développement d'engins télé-opérés a permis à d'autres États de se lancer dans l'exploration des fonds abyssaux. » Mais comment un programme sur la tectonique des plaques a-t-il pu aboutir à la découverte de l'hydrothermalisme ? Imaginez un

Copyright © 2017 Editions Quae.

globe terrestre. On y voit, à équidistance des continents, une large cicatrice brisant le cœur des océans. Ces 60 000 kilomètres de sutures sont appelées « dorsale océanique ». C'est une zone où le magma remonte à la surface, forme une chaîne de montagnes sous-marine aussi haute que les Alpes et produit ainsi de la matière pour une nouvelle croûte océanique. Ce processus est lié à la tectonique des plaques qui permet le renouvellement des fonds marins. Au niveau de la dorsale, la chaleur liée à la présence du magma et l'existence de multiples failles et fissures favorisent la circulation de l'eau de mer dans la croûte océanique. Depuis la naissance des océans, il y a 4 milliards d'années, cette circulation s'opère à un rythme de marathon. Ainsi, l'intégralité des eaux de mer aurait traversé plusieurs centaines de fois le réseau fracturé de la croûte océanique. Au cours de cette odyssée, les fluides se chargent des éléments métalliques des roches avec lesquelles ils sont mis en contact. Ils rejaillissent par les cheminées appelées « fumeurs noirs » le long de la dorsale. Un site hydrothermal actif peut regrouper une cinquantaine de fumeurs. Leur aspect frêle d'entonnoirs renversés, avec pour ouverture un trou de seulement 2 centimètres de diamètre, cache bien leur jeu : ces monstres recrachent des fluides acides à 350 °C à la vitesse de quelques mètres par seconde ! Les particules métalliques contenues dans l'eau sont presque intégralement dispersées sous la forme d'épaisses fumées noires. Tout ce qui ne part pas en panache permet à la cheminée de se consolider ou de se reconstituer lorsqu'elle s'effondre. Étonnamment, la vie barbote avec plaisir dans cet environnement hostile : des vers géants (*Riftia pachyptila),* pouvant atteindre plus de 2 mètres, des bivalves aux coquilles longues de 20 centimètres et tout un florilège d'invertébrés vivant de la chimiosynthèse, mais aussi quelques rares poissons

Copyright © 2017 Editions Quae.

comme la chimère *Hydrolagus*, cousine des requins. Les industries minières s'y sentiront beaucoup moins à l'aise. Aussi, ce sont les sites anciens et désormais éteints qui pourraient être valorisables selon Yves Fouquet : « À l'image des volcans sur terre, on peut s'attendre à ce qu'il y ait davantage de sites hydrothermaux inactifs que de jeunes sites encore actifs. Par ailleurs, les sites hydrothermaux récents présentent une biodiversité extrêmement riche et exubérante qu'il faut protéger. Pour l'exploitation, tout pousse donc à se tourner vers les sites inactifs. » La contrainte est dans la localisation de ces sites inactifs. Alors que l'on a facilement repéré près de 200 sites actifs à des profondeurs entre 800 et 5 000 mètres grâce aux panaches des fumeurs qui déposent les métaux jusqu'à 50 kilomètres à la ronde, seule une recherche systématique par des opérations près du fond permettra de localiser les sites inactifs. Cela semble pour l'heure bien trop coûteux. Quant aux sites déjà identifiés, ils attirent l'intérêt des miniers, à commencer par celui des eaux territoriales de la Papouasie-Nouvelle-Guinée où Nautilus Minerals a jeté son dévolu.

Que faire ?

L'entreprise néerlandaise FairPhone produit des *smartphones* ayant des durées de vie supérieures à celles des *smartphones* du commerce classique, sans obsolescence programmée (facilement réparable) et qui vise un recyclage des métaux.

S'il arrive à son terme, ce projet unique au monde donnera peut-être des informations sur les moyens de limiter les impacts environnementaux d'une telle exploitation. Indéniablement, ces projets miniers auront pour résultat la destruction des habitats de la faune locale et la formation d'un nuage de particules fines susceptible

Copyright © 2017 Editions Quae.

d'ensevelir les espèces suspensivores ou leur alimentation. De plus, il est assez probable qu'une activité minière soit associée à des rejets tels que les débris de minerais, les sédiments accrochés, l'eau de lavage,… de quoi engendrer de la turbidité et une perturbation de la biodiversité.

Les mirages de l'hydrogène

Fin 2016, *HY4* faisait son *show-off* sur le tarmac : ce quadriplace fonctionnant à l'hydrogène venait renforcer la fulgurante ascension des avions zéro émission. À long terme, les avionneurs rêvent d'un taxi-avion-écolo électrique transportant une dizaine de personnes sur de courtes distances. Dans cet appareil, l'hydrogène sert de combustible à une pile qui ne rejette que de la vapeur d'eau. Seul hic, la production d'hydrogène qui, elle, est très gourmande en combustible fossile ! C'est en chauffant du gaz naturel ou des hydrocarbures sous pression que l'on dégage les mètres cubes d'hydrogène utilisés chaque année pour la fabrication d'engrais, la synthèse de matière plastique ou l'industrie du verre. Le développement des piles à hydrogène pourrait accroître encore cette demande. Aussi, la découverte par l'Ifremer d'hydrogène naturel dans les fluides hydrothermaux a déclenché une série de campagnes scientifiques grâce auxquelles sept sites produisant d'importantes quantités de ce gaz explosif ont été identifiés sur la dorsale Nord-Atlantique. Toutefois, la présence d'une source d'énergie n'en fait pas un gisement exploitable : comment récupérer des gaz provenant de fluides à plus de 350 °C localisés à des profondeurs variant entre 2 000 et 4 000 mètres ? Plus récemment, des chercheurs de l'Ifpen (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) auraient mis au jour des émissions d'hydrogène sur le continent dans des quantités suffisantes pour envisager l'exploitation. Celle des fonds sous-marins a donc été remisée au placard, pour l'instant du moins.

À terre, l'ouverture d'une mine prend environ une quinzaine d'années, en mer, cela devrait prendre plus de temps. Si on ajoute à cela l'incertitude sur les impacts environnementaux, la méconnaissance des gisements d'intérêt et l'absence de législation, on aboutit à une

Copyright © 2017 Editions Quae.

exploitation industrielle à l'échelle mondiale assez lointaine. Mais parfois, il suffit d'un franc-tireur pour engager le combat de toute une armée et si le projet de Nautilus Minerals devient opérationnel en 2018 cela donnera certainement valeur d'exemple pour les industriels attentistes. C'est pourquoi l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) compte élaborer un cadre réglementaire pour une exploitation dans les eaux internationales qui sont précisément les plus riches en minerais.

LA FIÈVRE DE L'OR NOIR PATINE DANS L'OCÉAN BLANC

Avec parfois jusqu'à 150 nationalités à bord, certaines plateformes pétrolières offshore évoquent de petites Babel couchées sur la mer. Longues comme trois terrains de football, elles partagent avec ce sport la frénésie du qui-vive permanent. Deux cents hommes, ouvriers, chefs d'équipes, ingénieurs et techniciens y travaillent officiellement 12 heures par jour. La culture du risque est de mise, meilleure façon d'exorciser l'image de la tour biblique s'effondrant. Mais l'agitation des humains est vite dans l'ombre de la démesure des infrastructures. Dans la catégorie vainqueur des plus grandes profondeurs, on découvre *Stones*, une exploitation située dans le golfe du Mexique. On y puise l'or noir sous une tranche de sédiments épaisse de 5 kilomètres et surmontée d'une colonne d'eau longue de 3 kilomètres. Le gisement exploité se trouve donc 8 kilomètres sous le niveau de la mer ! Vous aviez peut-être en tête une plateforme fixée aux fonds marins mais les modèles aujourd'hui en vogue sont flottants. En surface, la plateforme comporte toujours les symboles classiques : le derrick et la torchère. Sous l'eau, elle ressemble à une méduse géante dotée de dizaines de tentacules qui pendent élégamment vers leur source nourricière. Sous terre, ces

Copyright © 2017 Editions Quae.

tentacules se transforment en bras d'acier et plongent sous le plancher de l'océan pour puiser les hydrocarbures ou restent en surface pour prendre le pouls du gisement. Sur les mers du globe, les plateformes pétrolières assurent plus du tiers de la production mondiale de pétrole (un peu moins pour le gaz).

Depuis les années 1960, la consommation mondiale de pétrole a doublé et devrait encore augmenter d'un tiers d'ici à 2035. En parallèle, la moitié des réservoirs potentiels découverts depuis dix ans se situent dans l'espace maritime. Ces réserves sont en moyenne dix fois plus larges que les gisements découverts à terre et sont mieux réparties sur le globe. L'exploitation offshore a débuté dans le golfe du Mexique (1947), puis en mer du Nord (1971), et bat son plein au large du Brésil ou dans les eaux du golfe de Guinée (Nigeria, Gabon, Angola). La mer de Chine vient, elle aussi, de dévoiler d'importants champs pétroliers. Progressivement, la prospection s'aventure vers des profondeurs plus grandes et des régions hostiles comme en Arctique. Le pôle Nord renfermerait 13 % des ressources mondiales non découvertes de pétrole (et 30 % de celles de gaz). Depuis cette estimation, publiée en 2008 par l'Institut de géophysique américain (USGS), l'Arctique est devenu le nouvel eldorado du XXIe siècle. En mer de Pechora, la plateforme russe *Prirazlomnoye* produit du pétrole depuis 2013. En mer de Barents, les Italiens ont démarré l'exploitation de *Goliat*, la plateforme la plus au nord de la planète, opérationnelle depuis 2016. Les Français développent en partenariat avec une compagnie russe un énorme projet gazier dans la péninsule de Yamal, ils détiennent aussi des droits pétroliers et gaziers au large de l'île de Baffin, au Canada.

Les icebergs, les tempêtes, les litiges territoriaux, la fronde des écologistes mais surtout le manque de connaissances et

Copyright © 2017 Editions Quae.

de recul n'ont pas limité l'appétit des compagnies pétrolières. Leur premier obstacle est économique. Or, depuis les années 2000, la hausse du baril de brut a rendu envisageable les forages dans le Grand Nord. Depuis, les fluctuations du marché n'ont pas radicalement inversé cet élan. Ainsi, la chute à moins de 50 dollars le baril fin 2016 n'a pas empêché la Norvège de lancer des processus d'enchères sur de nouvelles zones à prospecter. Deuxième obstacle : la résistance des éléments naturels dans cet environnement extrême. Une résistance qui s'efface avec le réchauffement climatique. Déjà deux routes maritimes se sont libérées avec la fonte des glaces : le passage du Nord-Est, côté Canada, et celui du Nord-Est, côté Sibérie. À eux deux, ils ceinturent l'axe de la Terre tel un collier dont le nœud se resserre avec l'augmentation des températures. Les images satellitaires de la Nasa, enregistrées depuis 1980, permettent de s'apercevoir que la banquise d'été se réduit tous les dix ans de 13 % (relevés sur le mois de septembre). La diminution est si rapide que l'on se pose la question de savoir si la banquise arctique ne disparaîtra pas en période estivale dans la décennie à venir. Fantasmée par Jules Verne dans son récit *Les aventures du capitaine Hatteras,* la mer polaire, libre de glace, pourrait bientôt devenir réalité. En explorant le cœur de cette mer, le capitaine *Hatteras* devient fou. Espérons qu'en choisissant d'extraire le liquide noir des entrailles de l'Arctique, les pays riverains ne courent pas à leur perte.

Copyright © 2017 Editions Quae.

HYDRATES DE GAZ : *DR. JEKYLL* OU *MR. HYDE* ?

Sorcellerie ou magie ? Pour le quidam, voir un glaçon s'enflammer sous l'étincelle d'un briquet suscite une fascination matinée d'effroi. Pour le chimiste habitué aux paillasses, une analyse cristallographique permet d'identifier un gaz inflammable, essentiellement du méthane,

enveloppé par un maillage de molécules d'eau cristallisées. Pour le minier, cette glace qui brûle pourrait être une piste vers des gisements d'hydrocarbures à exploiter.

Appelés hydrates de gaz, ces glaçons demeurent stables sous des conditions de pressions et de températures telles qu'on les trouve dans le pergélisol des régions arctiques (sol glacé en permanence des hautes latitudes) et dans les sédiments marins. À l'air libre, les glaçons se transforment en flaques et les gaz, principalement du méthane, s'échappent. Or, le méthane utilisé pour alimenter nos gazinières et notre chauffage est la deuxième source d'énergie sur terre. D'où l'intérêt des hydrates de gaz qui ont été observés pour la première fois en Alaska et en Russie, puis prélevés par carottage dans la mer Noire en 1972. Depuis, plusieurs expéditions ont révélé leur présence en de nombreux endroits en mer : côte ouest du continent américain, Sud-Est de l'Asie, Arctique, etc. Bien qu'il soit très difficile d'estimer leur abondance sur terre, un minimum de 1 000 teramètres cubes est communément admis. En comparaison, les réserves prouvées de gaz conventionnels sont de l'ordre de 180 teramètres cubes et la consommation annuelle mondiale de 3 teramètres cubes. Précisons toutefois que ce volume ne donne aucune idée du pourcentage de gaz économiquement et techniquement récupérable. Certes, la combustion des hydrates de méthane émet du CO_2 mais de manière équivalente au gaz naturel et moins que le charbon et le pétrole. C'est pourquoi les pays importateurs de gaz comme le Japon ou la Corée du Sud ont lancé des campagnes de recherche. Taïwan, le Vietnam, l'Inde et la Chine sont également attirés par cette nouvelle source d'énergie. En France, la magie des hydrates de gaz ne semble pas opérer pour la bonne raison que nos espaces maritimes n'en possèdent pas.

Copyright © 2017 Editions Quae.

En 2013, le premier forage offshore a été réalisé à 80 kilomètres du Japon, dans la fosse de Nankai. Pendant une semaine, sous 1 000 mètres d'eau, une entreprise d'État est parvenue à extraire 120 000 mètres cubes de méthane. Un deuxième test est prévu avant 2020 avec pour objectif de maintenir la production de combustible durant un mois. Seul dans la course, le Japon n'a toujours pas présenté la technologie qui pourrait assurer une exploitation à long terme. Aucune autre expérience d'exploitation n'est envisagée en milieu marin à ce jour. Cette frilosité s'explique en partie par le manque de maturité technologique mais aussi par la dangerosité potentielle des hydrates de gaz. À l'image du *Dr. Jekyll*, les hydrates de gaz peuvent apparaître comme une source d'énergie pleine de promesses ou, à l'image de *Mr. Hyde*, comme une source incontrôlable de gaz à effet de serre.

Première crainte : que l'extraction des hydrates de gaz s'accompagne d'un relâchement du méthane dans l'atmosphère. Selon certaines hypothèses, les mystérieuses disparitions du Triangle des Bermudes seraient liées à des remontées massives de bulles de méthane. Ces dernières auraient transformé la densité de l'eau au point de lui enlever ses capacités de portance. S'ensuivrait une inéluctable plongée des bateaux au fond de l'océan Atlantique. Même scénario pour les avions qui perdraient tout contrôle à cause d'une différence de densité de l'air, généré par la diffusion du gaz. Selon d'autres hypothèses, le gaz n'aurait pas le temps de parvenir à la surface de l'eau grâce aux bactéries mangeuses de méthane. Leur impressionnante activité a pu être observée après l'explosion de la plateforme pétrolière *Deep Water Horizon* dans le golfe du Mexique, en 2011. Alors que pas moins de 20 % des hydrocarbures relâchés au cours de cette catastrophe étaient sous forme de méthane, les gloutonnes auraient dévoré, en

Copyright © 2017 Editions Quae.

seulement quelques mois, l'essentiel des 400 000 tonnes de gaz. Ouf! L'armée de nettoyeuses aurait préservé l'atmosphère d'une bouffée de méthane dont le pouvoir de réchauffement est 25 fois supérieur à celui du CO_2! C'est du moins ce que nous affirmaient des études menées juste après la catastrophe. Là aussi, il n'y a pas consensus.

Les hydrates de gaz sont également présumés coupables de glissements de terrain. Sous mer comme sur terre, ces phénomènes naturels sont déclenchés par l'accumulation de couches sédimentaires qui deviennent trop lourdes et finissent par se compacter et s'effondrer brutalement. Au large de la Norvège, une cicatrice large de 300 kilomètres témoigne d'un glissement de pente dont le dernier évènement, survenu il y a 8 000 ans, aurait provoqué une vague de 20 mètres au-dessus des îles Shetland. On retrouve des traces de ce tsunami (sous forme de galets dans les tourbières) jusque dans le pourtour de l'Atlantique Nord. Des épisodes d'une telle ampleur demeurent assez rares alors que de petits effondrements sous-marins sont très communs. Dès lors, la question est de savoir si l'instabilité d'une zone ne serait pas accentuée par l'extraction des hydrates de gaz? Dans le golfe de Guinée, l'Ifremer a étudié une zone de 40 kilomètres carrés, parsemée d'effondrements. L'équipe du laboratoire Géosciences marines assimile cette zone à un cratère de plusieurs dizaines de mètres de profondeur. « Des fractures naturelles ont permis au méthane, enfoui à plusieurs centaines de mètres sous le plancher océanique, de remonter vers la surface pour former un dôme dans les sédiments qui affleurent. Au fil du temps, le gaz s'est échappé dans l'eau et le dôme s'est effondré. La corrélation entre les déformations sédimentaires et la présence d'hydrates de gaz est évidente. Le dégazage est un processus cyclique avec une périodicité de 100 ans et les déformations sédimentaires

Copyright © 2017 Editions Quae.

s'opèrent à plus longue échelle. « Il me semble tout à fait prématuré d'envisager l'exploitation de ces gaz car il s'agirait d'une extraction quasi instantanée pour laquelle on ne connaît absolument pas la réponse du sédiment. », explique Nabil Sultan, responsable du laboratoire. Côté océan Pacifique, les programmes de recherche portent, quant à eux, sur les meilleures techniques d'exploitation. Le curseur du principe de précaution dépend éminemment des enjeux économiques de chaque région.

L'EXPLOITATION… DES DROITS MAIS AUSSI DES DEVOIRS

En 2015, la France s'est agrandie de 579 000 kilomètres carrés, l'équivalent de la superficie de l'Hexagone. Les nouveaux territoires ont été gagnés sur la mer et positionnent la France comme la seconde puissance mondiale en termes de surface maritime. Mais ce n'est pas pour la gloire que l'État a constitué durant 15 ans les dossiers nécessaires à l'obtention d'une telle extension. C'est pour garantir ses droits souverains sur les ressources du sol et du sous-sol en vue d'une exploitation future de ces territoires.

Le droit en mer répond à la Convention des Nations unies de 1982 selon laquelle chaque pays côtier dispose d'un espace maritime large de 200 milles nautiques (370 kilomètres) appelé « zone économique exclusive (ZEE) ». Le pays y exerce sa souveraineté et peut exploiter les ressources à la fois du sous-sol et des eaux sus-jacentes. Au-delà de cette zone, les eaux et les fonds marins sont régis par des instances internationales et considérés comme un bien commun de l'humanité. Sous certaines conditions géologiques, les pays côtiers peuvent demander que leurs prérogatives sur les fonds soient étendues jusqu'à 350 milles (650 kilomètres) dans ce qu'on appelle le plateau conti-

Copyright © 2017 Editions Quae.

nental. Mais ce droit concerne uniquement les fonds marins (sol et sous-sol), les eaux restant, quant à elles, du domaine international. Là où disparaissent les plateaux continentaux, commence une zone internationale constituée des plaines abyssales qui échappe à toute appropriation.

Ces règles sont établies et reconnues par les pays signataires de la Convention mais lorsque des ressources minérales et des hydrocarbures sont en jeu, plus personne n'y voit clair. En Arctique par exemple, les pays circumpolaires se disputent certaines zones de chevauchements. En 2007, la Russie a planté son drapeau sur la dorsale Lomonosov, une chaîne de montagnes située entre le Groenland et le plateau continental sibérien, pour signer son appropriation d'une zone qu'ont revendiqué le Danemark et le Canada l'année d'après. Les tensions se limitent généralement aux États riverains : Canada, États-Unis (avec son État de l'Alaska), Norvège, Russie, le Royaume du Danemark (avec son pays constitutif, le Groenland) et les trois États non-riverains (Finlande, Islande, Suède). Depuis 1996, ces huit États tentent de coopérer dans l'enceinte politique du Conseil de l'Arctique. La France y a un statut d'observateur depuis 2000, parmi onze autres pays européens et asiatiques.

La situation est plus compliquée en Asie où depuis toujours, la Chine, les Philippines, le Vietnam, l'Indonésie et la Malaisie se frottent dans une mer semi-fermée, couvrant 3 millions de kilomètres carrés et parsemée d'îlots inhospitaliers. Si la mer de Chine suscite tant de convoitise, c'est qu'elle regorge de poissons, de pétrole, de gaz et qu'un tiers du commerce maritime de la planète transite par ses eaux. Chacun se dispute le contrôle de la région et les tensions se cristallisent au point qu'en 2016, Manille (Philippines) a réclamé l'intervention de la CPA, une Cour de justice située à La Haye, qui arbitre la plupart des conflits maritimes. Son verdict : « La Chine n'a pas de

Copyright © 2017 Editions Quae.

droits historiques en mer de Chine méridionale. » Cela n'a pas refroidi Pékin qui continue de réclamer des droits sur des îles situées dans la ZEE des Philippines, sous prétexte qu'il s'agit d'un passage emprunté historiquement par son pays. Pour asseoir son pouvoir, Pékin bloque les navires philippins, intimide les marins-pêcheurs et érige des îles artificielles dans l'archipel des Spartleys. Les récifs inhospitaliers sont poldérisés de façon à pouvoir construire une piste d'aéroport, une casemate et un semblant d'économie afin de prétendre à l'obtention d'une ZEE. En 2015, la surface de ces îles bondissait de 8 à 13 kilomètres carrés en six mois ! Elles ont non seulement été agrandies mais rehaussées pour ne plus se trouver sous le niveau de la mer. Pour ce faire, une drague géante de 127 mètres a permis de pomper le sable, les sédiments et les coraux environnants, occasionnant des dégâts considérables sur l'environnement. Au Vietnam, les pêcheurs se plaignent également des assauts répétés de navires civils chinois qui les abordent et les somment de ne plus s'aventurer dans les zones réclamées par la Chine. Or, celle-ci veut mettre la main sur 80 % de cet espace marin. Le gâteau que tente de s'octroyer la Chine n'est pas uniquement fait de minéraux et de ressources énergétiques provenant des fonds marins. Il y a d'autres enjeux, halieutiques, territoriaux, stratégiques et politiques, mais l'existence de richesses dans les fonds de la mer de Chine ravive sa détermination.

Tous ces conflits ne doivent pas occulter une autre facette dont l'humanité a su faire preuve lorsqu'ont émergé des revendications sur le pôle Sud. L'Antarctique est un modèle de gouvernance multilatérale grâce auquel cet environnement exceptionnel a été préservé jusqu'à ce jour. Contrairement à l'Arctique qui est une mer gelée, l'Antarctique est un continent recouvert de glace disposant d'un statut particulier grâce à 53 pays qui en ont fait

Copyright © 2017 Editions Quae.

une « réserve naturelle consacrée à la paix et à la science » où toutes activités militaires ou à des fins d'exploitation sont interdites. Ce pacte incroyable remonte à la signature, en 1959, du Traité de l'Antarctique entre 12 pays (dont la France) qui venaient d'implanter des bases scientifiques sur le continent blanc. Depuis, le Traité a été renforcé par des conventions sur la protection et la conservation de la faune et de la flore marines. En 1998, le Protocole de Madrid qui vise à préserver l'environnement fait provisoirement taire les revendications d'appropriation ou d'exploitation de certains signataires du Traité de l'Antarctique. Cependant, des incertitudes subsistent : les revendications territoriales sont gelées, mais les revendications maritimes persistent. Quatorze nations ayant ratifié le Traité de l'Antarctique n'ont pas signé le Protocole de Madrid qui stipule, entre autres, que l'exploitation des ressources minérales est interdite. Aussi, la pression monte quand le monde réalise que des réserves minérales sont potentiellement présentes. En 2009, la Russie a testé la volonté de ses partenaires de continuer à protéger les ressources de l'Antarctique, en déclarant vouloir engager des « investigations complexes sur les ressources minérales, en hydrocarbures et autres ressources naturelles de l'Antarctique. » Les délégués des autres pays ont demandé des explications, ce à quoi la Russie a répondu que cela ne concernait évidemment que des activités à caractère scientifique ! La Chine ne cache pas non plus ses intentions de « prospections scientifiques ». Certains pays attendent impatiemment 2048, date à laquelle prendra fin le moratoire qui protège le pôle Sud d'une exploitation minière. D'autres se battront certainement pour le conserver…

Copyright © 2017 Editions Quae.

7

LES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES (EMR)

La Conférence sur le climat, qui s'est déroulée fin 2015 à Paris (COP 21), a abouti à un accord universel en matière de lutte contre le dérèglement climatique : 195 États se sont engagés à formuler des stratégies pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre sur le long terme. Notre époque aborde une transition énergétique qui devrait induire un véritable changement de modèle de société quels que soient les errements politiques en cours. Cette société en gestation serait non seulement consommatrice d'énergie mais également actrice de sa maîtrise et de son efficacité. Pour cela, mieux vaut avoir plusieurs cordes à notre arc, autrement dit, varier les sources d'énergies et proscrire, ou du moins minimiser, l'usage des énergies fossiles, responsables d'importantes émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce bouquet énergétique, les énergies renouvelables devraient avoir la part belle. Déjà, leur exploitation est largement engagée à terre. En mer, elle émerge en fonction du degré de maturité des techniques :

– *énergie tirée des marées* : des usines marémotrices sont opérationnelles depuis 50 ans ;

– *énergie tirée du vent en mer* : les éoliennes offshore sont en phase de déploiement ;

Copyright © 2017 Editions Quae.

– *énergie tirée des courants* : les hydroliennes pourraient être exploitées après 2020 ;
– *énergie tirée des vagues* : les systèmes houlomoteurs pourraient être exploités après 2025 ;
– *énergie thermique des mers (ETM)* : les usines sont en cours de développement, exploitation industrielle après 2030 ;
– *énergie des gradients de salinité* : peu de visibilité sur le développement à court ou moyen terme.

Comprendre le facteur de charge

Le facteur de charge est le ratio entre l'énergie produite par une machine sur une période donnée et l'énergie qui serait produite si cette machine fonctionnait en permanence à son maximum durant cette même période. En effet, hormis l'énergie thermique des mers (ETM), les énergies marines sont intermittentes (vent, houle) ou fluctuantes (marée, courant) avec pour conséquence un potentiel de production d'électricité variable tout au long de l'année en fonction des saisons, de l'emplacement, de la météorologie, etc. En France, d'après le Réseau de transport d'électricité (RTE), le facteur de charge de l'éolien offshore serait de 40 à 50 %, contre 20 à 30 % pour l'éolien terrestre. En première approche, la production annuelle en mégawattheures (MW/h) d'une machine, d'un parc ou d'une centrale d'une puissance installée donnée (en MW) sera le produit de la puissance par la durée en heures (8 760 heures par an) modulée du facteur de charge.

Conjuguant maturité technologique et fort potentiel énergétique, les éoliennes offshore connaissent un déploiement exponentiel depuis les années 2000. Grâce à cette filière, les côtes européennes cumulaient, fin 2016, environ 12 500 mégawatts (MW) raccordés au réseau électrique. À titre de comparaison, une centrale nucléaire a une puissance installée de 900 à 1 500 MW.

La France s'est fixé comme objectifs 500 MW d'éolien posé à l'horizon 2018 et 3 000 MW en 2023. Un objectif

Copyright © 2017 Editions Quae.

deux fois moins ambitieux que celui du Grenelle de la mer, que l'on s'était fixé en 2009. Aussi, les engagements nationaux ne garantissent pas l'avenir. S'il est délicat de se fier aux engagements politiques, les affirmations des industriels ne sont pas plus fiables. Sans pointer d'objectifs précis, il n'est pas interdit de se fier à la tendance générale : une inéluctable montée en puissance des énergies marines renouvelables.

EN MER, ÉOLE EST PLUS FORT

Prenez l'ascenseur, montez au deuxième étage de la tour Eiffel puis balayez Paris du regard en imaginant 160 hélices rayonnant autour de vous à hauteur d'yeux. Voilà à quoi ressemble *Gwynt y Môr*, le deuxième plus grand parc au monde d'éoliennes en mer (576 MW installés). Avec des pâles longues de 52 mètres, plantées sur un mât à 150 mètres au-dessus de l'eau, les éoliennes offshore dépassent le gigantisme de leurs cousines terrestres. Les mâts plongent de 20 à 30 mètres sous l'eau avant d'atteindre le fond marin où ils sont solidement ancrés grâce à un mono-pieu d'acier enfoncé dans le sous-sol. Installé à environ 12 kilomètres du pays de Galles, *Gwynt y Môr* a été entièrement raccordé au réseau électrique britannique mi-2016 et fournit l'équivalent de 400 000 foyers en électricité. C'est du moins ce que l'on espère par « temps normal » car tout dépend bien sûr du bon vouloir d'Éole, imprévisible au-delà de 3 jours, variable, mais… non polluant et inépuisable !

Une source d'énergie écologique et renouvelable, c'est la combinaison rêvée à l'aube du XXIe siècle en prise avec une crise écologique. Une énergie d'autant plus convoitée en mer qu'on la puise loin des regards, à plusieurs kilomètres de la côte, éloignée des terres arables, des forêts ou

Copyright © 2017 Editions Quae.

des zones d'habitation. Autre point fort, une éolienne en mer produit jusqu'à deux fois plus d'électricité que sa cousine terrestre grâce à des vents forts et réguliers. Résultat : en moins de deux décennies, plus de 3 000 éoliennes ont peuplé les mers européennes et peuvent répondre à 1,5 % des besoins en électricité. En 2016, on installait en moyenne une éolienne par jour dans les mers d'Europe mais ce rythme pourrait quintupler avec les projets en cours d'élaboration. *Gywnt y Môr* a beau caracoler en deuxième place du classement mondial des plus grands parcs éoliens en mer, il risque fort d'être rapidement détrôné. Un bon candidat pour le remplacer : *Hornsea*. Ce site en construction a pour objectif d'alimenter en électricité un million de foyers au Nord de l'Angleterre. Pour ce faire, il faudra plus de 174 éoliennes (puissance unitaire 7 MW) posées au large des côtes du Yorkshire sur une surface d'environ 400 kilomètres carrés. Entre *Gywnt y Môr* et *Hornsea*, les pâles auront grandi, le mât aussi, et le rotor aura augmenté en capacité. Pour devenir opérationnel, *Hornsea* se fixe comme horizon 2020, c'est déjà demain.

Fin 2015, les machines européennes se répartissaient sur 84 parcs raccordés au réseau électrique de onze pays avec pour chef de file le Royaume-Uni, secondé par l'Allemagne et le Danemark. Autrement dit, si vous souhaitez voir des champs d'éoliennes sur l'eau, dirigez-vous du côté de la mer du Nord, de la mer d'Irlande ou de la mer Baltique. Dans ces zones, les mers peu profondes permettent l'ancrage des pieux à moins de 50 mètres. Le vent est favorable grâce à une vitesse moyenne de 10 à 11 mètres par seconde en mer du Nord contre un peu moins de 9 mètres par seconde en Atlantique, sans comparaison avec la terre, où les vitesses moyennes sont de 4 à 7 mètres par seconde. Outre la bathymétrie et les vents,

Copyright © 2017 Editions Quae.

ce sont des choix politiques qui expliquent la carte du déploiement offshore : une île comme le Royaume-Uni a tout intérêt à tirer son autonomie énergétique de la mer ; l'Allemagne ayant choisi de sortir du nucléaire a besoin d'un plan B ; quant au Danemark, très dépendant des énergies fossiles, il initie le mouvement dans l'éolien offshore dès 1991 avec l'inauguration du tout premier parc au monde. En 2001, il demeure précurseur avec la création du plus grand parc offshore mondial. Si la France est encore inexistante sur la liste des abonnés aux électrons offshore, la situation évoluera rapidement avec les appels d'offres et projets en cours. En 2017, six parcs sont en cours ou en voie de construction (Saint-Brieuc, Le Tréport, Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Saint-Nazaire et l'île d'Yeu-Noirmoutier totalisant une puissance de 3 000 MW répartis sur plus de 400 éoliennes offshore, à comparer aux 11 000 MW actuellement produits par l'ensemble de l'Europe. Si l'Europe est de loin le plus grand producteur mondial, il ne faut pas mésestimer la Chine et ses 500 MW raccordés.

Avec ce Graal en mer, va-t-on démultiplier les projets au point de couvrir l'ensemble de nos côtes d'un ruban d'éoliennes ? L'association européenne qui regroupe les industriels du secteur, European Wind Energy Association (EWEA) rêve de fournir 13 à 17 % de la consommation électrique européenne en 2030. C'est oublier les conflits d'intérêts entre les exploitants, le fret, la sécurité maritime, les riverains, les touristes et les pêcheurs côtiers. En effet, les parcs offshore se situent généralement à proximité du littoral, là où l'épaisseur d'eau est inférieure à 50 mètres et les coûts d'implantation acceptables. Jusqu'à présent, la cohabitation entre activités de pêche et éoliennes s'avère compliquée. Les Allemands l'ont interdite, les Britanniques l'autorisent mais les marins-pêcheurs sont plus que

Copyright © 2017 Editions Quae.

sceptiques. Ainsi, la plus grosse association de pêcheurs de homards, Holderness Fishing Industry Group, craint que les vibrations des pales, l'ombre qu'elles provoquent et la chaleur générée par les câbles électromagnétiques détériorent l'habitat des crustacés. Par ailleurs, leurs filets, dragues et autres engins peuvent s'accrocher aux bases des éoliennes ou dans les câbles électriques, une forte houle les déporter vers une structure, sans compter que les alignements de ces géantes restreignent la navigation au point parfois de la rendre dangereuse. En France, la décision d'autoriser ou non la pêche revient au préfet et aboutit parfois à des résultats positifs comme à Saint-Brieuc où le projet en cours fera coexister des éoliennes et l'exploitation de coquilles Saint-Jacques. Toutefois, la plupart des marins s'opposent à l'installation des parcs avec la crainte d'une réduction de l'accès aux zones exploitables. Si certains, parmi les plus audacieux, espèrent que de nouvelles techniques permettent à l'avenir une exploitation sécurisée au sein des parcs offshore, c'est qu'ils ont entendu parler d'un retour possible des ressources halieutiques dans les parcs. En effet, plusieurs études ont constaté que les structures immergées (épaves, récifs artificiels) pouvaient se transformer en nourriceries, c'est ce que l'on appelle l'effet « récif ». Coquillages et petites algues se fixent sur les supports câbles, pieux et autres chaînes, favorisant ainsi l'agrégation d'autres espèces. En 2012, une étude portant sur le parc danois *Horns Rev* montrait que les poissons cohabitaient sereinement avec les aérogénérateurs mais cet effet « récif » reste controversé et dépendant des sites étudiés. C'est, quoi qu'il en soit, « le petit plus », souvent brandi, par les exploitants pour calmer le jeu des écologistes qui ne sont pas tous pro-éoliennes. Certes, les éoliennes sont moins polluantes que le charbon, moins dangereuses que l'uranium, mais lorsqu'on les concentre

Copyright © 2017 Editions Quae.

en grand nombre, elles peuvent avoir l'un des mêmes travers que les sources d'énergie plus classiques, à savoir une déperdition de l'électricité lors de son acheminement vers le consommateur.

Une autre branche écologiste redoute, quant à elle, l'impact des néo-moulins à vent sur les oiseaux marins. En effet, les perturbations visuelles et sonores d'une barrière d'éoliennes peuvent générer au pire des collisions, au mieux, un contournement de la zone avec une dépense d'énergie supplémentaire pour des animaux déjà bien affaiblis par la migration. Ces considérations sont prises très au sérieux comme l'a prouvé, en 2014, l'interdiction d'extension du plus grand parc de la décennie, *London Array*. En cause, le *plongeon catmarin*, une espèce considérée comme vulnérable qui se distingue par l'apparition d'un col rouge en été. Durant la migration hivernale, un tiers de sa population britannique se réfugie dans l'estuaire de la Tamise, sur la même zone géographique que *London Array*. De manière générale, la proximité des parcs éoliens avec des aires marines protégées ou des sites classés *Natura 2000* pose problème. Tous ces conflits d'usage sont inhérents aux nouveaux projets, surtout lorsqu'ils touchent un espace déjà partagé entre plusieurs acteurs. Aussi, bien qu'ils fassent beaucoup de remous localement, ces conflits ne freinent pas le déploiement global de cette technologie. Ils favorisent en revanche la concertation et les mesures compensatoires qui évitent certainement une colonisation massive et irréfléchie de l'espace.

Ourler les côtes d'éoliennes ne semble donc pas être la meilleure des solutions pour produire plus d'électricité offshore. Pourquoi ne pas augmenter la capacité de chaque turbine ? On se heurte alors aux limites techniques. La capacité des aérogénérateurs est proportionnelle au diamètre des pales qui, à ce jour, avoisine l'envergure de

Copyright © 2017 Editions Quae.

deux *Airbus A380* mis côte à côte. Dépasser cette taille ferait décoller les coûts et rendrait l'ensemble de la structure trop instable compte tenu des fondations. Sur monopieu, gravitaire ou jacket (structure tubulaire en treillis métallique reposant sur trois ou quatre pieux), les options pour les fondations ont déjà été passées en revue sans qu'aucune ne débouche sur une franche amélioration. Finalement, la vraie rupture technologique s'opère en retirant le problème. Plus de fondations, c'est l'avènement des éoliennes flottantes.

Tout pousse les éoliennes vers le grand large : accéder à de plus vastes zones maritimes, s'éloigner des littoraux encombrés et profiter de vents toujours plus forts et plus réguliers à des profondeurs d'eau pouvant aller jusqu'à 300 mètres. L'éolien posé devrait dominer son cadet flottant jusqu'en 2030, mais les spécialistes parient sur une inversion de la situation avant 2050. Cela paraît d'autant plus incroyable que, pour l'instant, aucun parc en exploitation industriel n'existe. Sur la planète, les démonstrateurs se comptent sur les doigts de la main : une éolienne mise à l'eau dans les eaux territoriales norvégiennes en 2009 ; deux autres au large de Porto (Portugal) et encore deux face à Fukushima (Japon). Calées sur le rythme des développements industriels (construction d'un démonstrateur puis d'une ferme pilote puis d'un parc), elles arrivent au compte-gouttes, font l'objet de réajustement, mais en 2017, une première ferme pilote devrait délivrer ses électrons en terre écossaise. Une ferme, c'est plus petit qu'un parc, elle est donc composée de seulement cinq éoliennes. Pour autant, leurs dimensions n'ont rien à envier aux éoliennes posées : elles s'élèvent à 178 mètres au-dessus de l'eau et s'ancrent 80 mètres dessous ; pèsent plus de 5 000 tonnes, soit autant qu'une trentaine de baleines bleues. Elles ressemblent à s'y méprendre aux

Copyright © 2017 Editions Quae.

éoliennes offshore sauf qu'elles sont fixées à une structure flottante. Celle-ci est reliée au fond par des chaînes métalliques ou des cordes à base de fibres synthétiques. Au fond, de gros blocs de béton, des pieux ou des ancres arriment le tout au plancher océanique. Les techniques ne font que s'améliorer et baisser en coût. Le challenge se situe encore une fois du côté de l'acceptabilité. En France par exemple, quatre fermes pilotes devraient voir le jour à l'horizon 2020, une sur l'Atlantique au large de l'île de Groix et trois en Méditerranée vers Gruissan, Leucate et Fos-sur-Mer. Outre les pêcheurs, les écologistes, il faut aussi prendre en compte la navigation car la Méditerranée représente l'une des principales routes maritimes du commerce international avec un tiers des échanges mondiaux. Malgré les incertitudes et frictions, un *modus vivendi* sera trouvé d'ici 2020 car aucune échappatoire n'est envisageable face à la double nécessité de réduire nos émissions de dioxyde de carbone et de diversifier nos sources d'énergie.

ON A TROUVÉ LE COURANT

Dans la famille des énergies marines renouvelables, si vous cherchez le prochain bébé, attendez-vous à ce qu'il s'appelle hydrolienne. Sa cadette l'éolienne offshore est en croissance industrielle depuis 2010, et sa mère, l'usine marémotrice est mature depuis les années 60. La petite dernière, l'hydrolienne, aborde ce tournant bien particulier entre gestation de la recherche et éclosion industrielle. En quinze ans, elle est passée du stade où l'on implantait les premiers démonstrateurs au déploiement de petites fermes pilotes comprenant cinq à dix machines en phase de test. Presque mature d'un point de vue industriel, l'hydrolienne se développe à vive allure et les premières fermes commerciales pourraient voir le jour

Copyright © 2017 Editions Quae.

avant 2030. Avec sa mère, l'hydrolienne a en commun d'utiliser l'énergie des courants marins. Son principe : transformer la force de ces courants en énergie électrique grâce à une turbine actionnée par le passage de l'eau. Son point fort : les courants étant prévisibles et permanents, elle offrirait un apport régulier d'énergie à la production nationale d'électricité. La régularité est une valeur d'exception dans la famille des énergies renouvelables, le soleil et le vent ne peuvent pas en dire autant. Avec sa sœur, l'hydrolienne a un air de famille, on parle même d'éolienne subaquatique version miniature. Alors qu'une pale d'éolienne peut atteindre 150 mètres de longueur, celle d'une hydrolienne de même puissance se rapproche davantage des 15 mètres. La formule magique ? H_2O, un liquide bleu ayant une densité 800 fois supérieure à celle de l'air. Or, cette densité, avec la vitesse des courants et la taille des pales, détermine la puissance récupérée au niveau des hélices. Phénoménale, la densité de l'eau compense la petitesse des pales. Reste le dernier facteur, la vitesse du courant marin qui doit être supérieure à 2 mètres par seconde pour que l'équation aboutisse à une puissance récupérée acceptable pour une véritable exploitation.

Pour atteindre les vitesses maximales de l'eau, il faut se placer dans des zones géographiques où les courants se concentrent à l'instar des détroits, chenaux et goulets, là où il y a un resserrement topographique. En France, ces configurations se trouvent au Fromveur, entre l'île d'Ouessant et l'archipel de Molène, où une hydrolienne expérimentale fonctionne ; ou encore dans les Côtes-d'Armor, entre Paimpol et l'île de Bréhat où est née la première ferme pilote utilisant deux hydroliennes pouvant alimenter en électricité jusqu'à 1 000 foyers. Les estuaires ont eux aussi des caractéristiques géomorphologiques

Copyright © 2017 Editions Quae.

favorables. En Europe, le plus grand d'entre eux est celui de la Gironde. Sur ses fonds sableux, une première machine est en phase test. En tout et pour tout, une cinquantaine de démonstrateurs fonctionnent sur les territoires maritimes d'Angleterre, de France, du Canada, de Corée. Malgré l'intérêt incontestable des industriels, ces singularités du rivage limitent l'exploitation industrielle de l'hydrolien. Dans le monde, 18 sites sont considérés d'importance assez significative — plus de 2 gigawatts (GW) — pour le déploiement de fermes commerciales. Avec 3 GW techniquement exploitables au raz Blanchard, situé au large de La Hague (Manche) et un autre spot en face de l'île d'Ouessant (Finistère), l'Hexagone possède deux de ces trésors. Dans ces coins de France, les énergies marines renouvelables ne sont plus un futur fantasmé et inaccessible. À Quimper, une PME a signé une première mondiale en immergeant une hydrolienne (1 MW) qui fournit de l'électricité au réseau insulaire d'Ouessant depuis 2015. À Brest, déjà deux rotors ont été assemblés sur place et mis à l'eau au large de Cherbourg, dans le cadre d'un projet de ferme pilote. Dans la ville des mythiques parapluies, un atelier de 25 hectares dont la construction est prévue en 2017 permettra l'assemblage des sept turbines qui occuperont le futur site pilote du raz Blanchard. Si ces démonstrateurs et pilotes confirment la faisabilité des projets commerciaux, la ville portuaire pourra s'écrier : Bingo ! 1 500 machines seront alors assemblées pour une capacité de production comparable à la moitié de la production attendue du futur réacteur pressurisé européen (EPR) de Flamanville.

Entre les sept machines en construction et les 1 500 à venir, les industriels devront démontrer la faisabilité technique et économique du projet, son efficacité énergétique, mais aussi son acceptabilité. Immergées, elles

Copyright © 2017 Editions Quae.

poseront *a priori* moins de problèmes paysagers pour les riverains et, situées dans des zones à fort courant, elles entrent peu en compétition avec les pêcheurs. Les rares études environnementales menées sur les premiers spécimens placés en mer, notamment dans la baie de Kvalsundet en Norvège (depuis 2003), donnent des résultats parcellaires et de portée limitée. Il est difficile de savoir comment la vie aquatique réagira au déploiement d'hydroliennes à une telle échelle. Comment réagiront les bancs de maërl, herbiers de phanérogames et autres champs de laminaires aux changements de courants ? Les oiseaux marins comme le macareux moine ou le guillemot de Troïl, qui peuvent plonger à plusieurs dizaines de mètres de profondeur et se propulsent à l'aide de leurs ailes, sauront-ils éviter le roulement des pales ? Quel impact aussi pour les poissons ? Plus généralement, les mammifères marins comme le phoque gris ou le grand dauphin sauront-ils détecter puis éviter les machines dans un environnement bruyant mais pourtant attractif grâce à sa forte concentration en poissons et crustacés venus coloniser les machines (stator, embase…) ?

Toutes ces questions n'ont pas toujours de réponses. Dans l'ensemble, les études scientifiques sont confiantes mais circonspectes sur les effets à long terme et à une telle échelle. Lorsque l'état de la connaissance le permet, il est possible d'entreprendre en concertation avec les acteurs de terrain (associations, syndicats professionnels, riverains…) les mesures nécessaires pour éviter les problèmes à venir. Mais, en l'absence de connaissances, faut-il rejeter en bloc le projet innovant ? Se pose ainsi la question de savoir où placer le curseur du principe de précaution. La France, comme la plupart des pays européens, estiment les incertitudes acceptables au vu des bénéfices. Les projets seront donc engagés et les éventuels problèmes gérés par un suivi au jour le jour.

Copyright © 2017 Editions Quae.

À moins que de nouveaux concepts technologiques constituent une réponse. Une centaine de projets propose des formes d'hydroliennes assez éloignées de l'image que l'on s'en fait aujourd'hui. Imaginez par exemple l'hydrofoil où les courants marins font battre une grande pale tel un drapeau au vent, ou encore, la turbine à effet Venturi où l'eau est forcée dans un conduit en forme de sablier couché à l'intérieur duquel se trouve le rotor. Fin 2016, c'est un cylindre flottant de 64 mètres que le Centre européen d'énergie marine (EMEC) mettait à l'eau au large des côtes écossaises. Son hydrolienne se cache au bout d'un bras mécanique qui se déploie une fois l'engin sur site. Son intérêt est de réduire les coûts d'installation, de maintenance et de démantèlement. Quel que soit le secteur industriel, la fin de vie des machines est souvent une zone d'ombre. Et pourtant, il ne s'agit pas d'un futur si lointain puisque la durée de vie des hydroliennes serait de 20 à 25 ans.

Et puis… et puis il y a les grands courants océaniques. Jusqu'à présent, la recherche se concentre sur des technologies liées au courant des marées qui suit la ronde cosmique Lune-Terre-Soleil. La lune est comme une locomotive qui tracte dans son sillage les océans et mers. Le soleil est l'aiguilleur qui s'impose tous les 15 jours pour les vives-eaux (marées de grande amplitude) ou les mortes-eaux (marées de faible amplitude). Mais il existe d'autres courants, en particulier ceux qui, comme le *Gulf Stream* ou le *Kuroshio*, participent à la circulation thermohaline des océans, ce vaste mouvement qui englobe l'ensemble des océans et dépend des vents, de la température, de la salinité, de la densité, etc. La puissance de ce djinn fait rêver, en particulier aux États-Unis où le *Gulf Stream* caresse la Floride à 8 kilomètres des côtes. Exploiter un millième de son énergie pourrait couvrir un tiers des besoins en électricité du pays.

Copyright © 2017 Editions Quae.

LES MOULINS À MARÉE

Voilà une énergie marine grâce à laquelle la France s'est démarquée par son rôle de pionnière : était-ce le souvenir des antiques moulins à marée égrainés le long des estuaires ou la politique volontariste des grands travaux de Charles de Gaulle ? Quoi qu'il en soit, c'est en Hexagone, à l'embouchure de la Rance (Bretagne), que la première usine marémotrice du monde s'est élevée. Nous sommes en 1967 lorsque les 24 turbines de l'usine se mettent à délivrer en électricité l'équivalent des besoins d'une ville comme Rennes (225 000 habitants). Les turbines sont intégrées à la base d'un barrage de 750 mètres de long qui relie les deux berges de l'estuaire de la Rance où se font face d'un côté Saint-Malo et de l'autre Dinard. Son principe ? Transformer l'énergie des marées en énergie électrique grâce à la mise en mouvement d'une hélice au passage de l'eau. Contrairement aux hydroliennes qui fonctionnent exclusivement grâce à la poussée horizontale des courants (énergie cinétique), les turbines marémotrices sont activées sous l'effet d'une différence de hauteur d'eau (énergie potentielle) : à marée descendante, il y a un fort dénivelé entre l'eau accumulée en amont du barrage et l'aval maritime. Sur la Rance, ce marnage peut atteindre 13,5 mètres, ce qui explique en partie le choix du site, second plus grand marnage au monde après la baie de Fundy (Canada).

Depuis un demi-siècle, les promesses du barrage en termes de production électrique ont été tenues, mais les impacts environnementaux sur le secteur en mécontentent plus d'un. Associations et élus locaux regrettent, pour les uns de ne plus pêcher les mêmes espèces qu'autrefois, pour les autres de ne pas disposer d'une plage de sable à cause de l'envasement. Si l'envasement,

Copyright © 2017 Editions Quae.

phénomène naturel dans les milieux estuariens, semble s'être accéléré avec le barrage, l'écosystème montre, quant à lui, une bonne adaptation. Ainsi, d'après plusieurs études menées entre 1971 et 2010 par la station marine du Muséum national d'histoire naturelle et le laboratoire Environnement et Ressources de l'Ifremer de Dinard, s'il y a bien eu modification de la biodiversité depuis 1966, celle-ci ne présente aucune altération majeure. « La faune rencontrée actuellement dans le bassin maritime est très semblable à celle présente avant la construction du barrage, même si la répartition des espèces diffère maintenant. Par ailleurs, le bassin maritime continue de remplir les fonctions écologiques classiques d'un estuaire. Il reste une zone de frayère et/ou de nourricerie pour les nombreuses espèces de poissons et la biodiversité « ordinaire » qu'il abrite (principalement constituée par les invertébrés) et continue à contribuer à l'existence de chaînes alimentaires classiques de milieux estuariens. La fonction de corridor pour les organismes migrateurs n'est pas, ou très peu, altérée, comme en témoigne la présence de seiches, congres ou anguilles. Le barrage n'est donc pas un obstacle au passage d'organismes, comme peuvent l'être les barrages hydroélectriques construits sur les rivières ou fleuves », rapporte Nicolas Desroy, spécialiste des invertébrés benthiques au laboratoire Environnement Ressources de Bretagne Nord (Ifremer), pour qui l'analyse de la situation dépend du regard que l'on porte sur la nature : « Lorsqu'on a une vision fixiste, on espère conserver les mêmes espèces et le même paysage qu'il y a 50 ans mais le secteur s'est industrialisé, la population s'est densifiée et les conditions environnementales locales mais aussi globales (augmentation de la température des eaux marines) ont changé ! »

Copyright © 2017 Editions Quae.

Approche fixiste ou pas, aucun décisionnaire ne songe actuellement à reproduire une opération similaire, côté français du moins, car en Asie des méga-projets se développent. Si quelques installations de moindre envergure ont vu le jour en Russie, en Chine et au Canada, c'est en Corée du Sud, sur le lac de Sihwa que s'est érigé en 2012 la plus puissante usine marémotrice du monde, avec une puissance installée de 254 MW contre 240 MW pour celle de la Rance. À la différence de l'usine française, celle de Sihwa a été construite sur une digue préexistante qui barrait la route aux échanges entre, d'une part, un lac artificiel et, de l'autre, la mer. Depuis 1994, ce milieu totalement confiné avait détérioré la qualité de l'eau au point de la rendre insalubre. L'installation des turbines a permis de rétablir une circulation de l'eau et l'exploitant affiche aujourd'hui des résultats environnementaux très encourageants. D'après ces données, l'usine marémotrice aurait en quelque sorte sauvé le lac de l'asphyxie. Fort de ce succès, le gouvernement sud-coréen s'est prononcé favorablement pour d'autres projets : dans la baie d'Incheon (1 320 MW) et plus récemment dans la baie de Garolim (520 MW). Toutefois, les sites étant différents, les configurations géomorphologiques aussi, les associations de protection de la nature ne comptent pas sur les mêmes résultats qu'au lac de Sihwa. Or, ces projets sont encore conditionnés par les résultats de la consultation publique préalable aux grands travaux.

Même situation côté britannique où le caractère prédictible et fiable de l'énergie marémotrice attise l'intérêt, tandis que l'impact environnemental d'un barrage effraie. Ainsi, dans l'estuaire de la Severn (pays de Galles), plusieurs projets ont été rejetés puis remis au goût du jour selon les élus. Compte tenu de la sensibilité des estuaires, zones humides dont l'écologie est unique et fragile, certains ingénieurs ont imaginé de nouveaux concepts : les lagons

Copyright © 2017 Editions Quae.

artificiels. Imaginez, le long des côtes ou à proximité, une digue circulaire formant un réservoir qui serait alternativement rempli et vidé au gré des marées. L'idée paraît évidente, elle permettrait potentiellement de réunir compétitivité et acceptabilité sociale et environnementale. Dans la baie de Swansea, sur le canal de Bristol (pays de Galles), un industriel défend depuis six ans un projet de mur marin de 10 kilomètres, fermé par un arc de cercle, comportant des turbines immergées pouvant alimenter en électricité plus de 150 000 foyers (320 MW). Son projet est particulièrement séduisant : le mur aurait pour fonction de protéger la ville des assauts de la houle et de la montée du niveau de la mer. Il serait accessible aux sportifs voulant courir, encadrés par la Grande Bleue ; le lagon servirait à la pêche de loisir et à l'aquaculture ; un site pédagogique sur les énergies marines accueillerait le public. Plurifonctionnels, ces ouvrages offrent aussi l'avantage d'une durée de vie estimée à 120 ans, avec un coût affiché équivalent à celui du nucléaire. De quoi peser en leur faveur dans un pays fortement dépendant énergétiquement alors qu'il dispose de l'un des plus forts potentiels marémoteurs au monde.

Si les lagons artificiels semblent donner un nouvel élan à l'énergie marémotrice, celle-ci reste inféodée à la réunion d'une géomorphologie favorable et de marnages importants (supérieur à 7 mètres). Des conditions présentes dans une dizaine de régions sur la planète.

Copyright © 2017 Editions Quae.

VAGUE, TEMPÉRATURE, SEL, FAITES VOS JEUX !

Houlomoteur

Lorsqu'il dessina sa célébrissime estampe, *La Vague*, le maître peintre Hokusaï ressentait certainement la puissance colossale du rouleau d'écume qui prenait vie sous

son pinceau. Au loin, le mont Fuji semble si petit, au premier plan, les barques se plient au bon vouloir des courbes formées par l'eau. Rien ne semble pouvoir maîtriser cette nature déchaînée. Et pourtant, il est peut-être possible de l'exploiter… c'est du moins ce que pensent les hommes du XXIe siècle. Transformer l'énergie des vagues en énergie électrique relève un peu d'un fantasme de démiurge qui se conforte dans un pourcentage : 80 % de nos besoins électriques pourraient être comblés par les vagues de l'espace maritime français. Un chiffre qui tombe à 10 % lorsqu'on quitte le domaine théorique pour s'attacher au potentiel réellement exploitable, celui qui prend en compte l'état actuel des technologies et les limites des sites d'implantation (acceptabilité, partage de l'espace…). C'est probablement décevant pour les démiurges mais beaucoup plus en phase avec la diversité du mix énergétique vers lequel on s'achemine.

Les vagues naissent sous l'effet du vent marin (la houle) et interagissent entre elles au cours de leur propagation pour former des vagues plus longues et plus régulières. Celles-ci peuvent alors se déplacer sur des milliers de kilomètres. Elles sont composées de trois forces : l'une horizontale génère l'avancée, l'autre verticale impulse le soulèvement et la troisième est liée au déferlement. Pas moins de 150 concepts tentent d'utiliser l'une ou plusieurs de ces forces : des systèmes à déferlement, à colonne d'eau oscillante, à franchissement, à immersion ou avec flotteurs. Pour l'heure, aucune installation n'est en service, hormis la centrale espagnole de Mutriku, qui approvisionne une centaine de foyers depuis 2011.

Le choix technologique n'ayant pas été figé, l'emplacement des futurs sites d'exploitation de la houle est encore incertain. On sait toutefois que les conditions les plus favorables sont des régions côtières balayées par les vents

Copyright © 2017 Editions Quae.

dominants comme au Cap (Afrique du Sud). Globalement, les latitudes élevées sont les mieux exposées et les côtes ouest européennes sont également bien dotées. En France, on estime que chaque kilomètre carré de mer occupé par des systèmes houlomoteurs pourrait alimenter en moyenne 7 000 à 8 000 foyers. Le faible impact visible est du meilleur effet, ce qui fait espérer que les machines ne gêneront pas les riverains. Demeurent bien sûr les conflits d'usages fort probables et l'impact environnemental encore méconnu. Le point faible de cette énergie : sa variation saisonnière, forte en hiver et faible en été. Néanmoins, grâce aux mesures satellitaires, l'état de la mer est prévisible à 24 heures, voire 48 heures, ce qui devrait satisfaire les régulateurs du réseau électrique. La frilosité des industriels concernant cette filière s'explique davantage par son manque de maturité. Pour l'heure, les machines ne présentent pas la résistance nécessaire pour affronter les colères de Poséidon. En 2014, un démonstrateur installé au large de la Réunion a été emporté par une tempête et en 2015, l'un des pionniers du secteur houlomoteur, l'entreprise britannique Pelamis, a déposé le bilan. Avant de parvenir à dompter la puissance des vagues, il faudra encore de l'ingéniosité et de l'ingénierie.

Énergie thermique des mers

Vous connaissez sans doute le capitaine *Nemo*, celui qui commande le *Nautilus* de *Vingt mille lieues sous les mers* ? Mais avez-vous noté l'une de ses phrases prémonitoires : « J'aurais pu, en effet, en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir de l'électricité par la diversité des températures qu'ils éprouvaient. » Le thermocouple que propose Jules Verne est tombé dans les oubliettes mais l'idée d'exploiter les différences thermiques de l'océan a fait son chemin et ouvert la voie à l'ingénieur

Copyright © 2017 Editions Quae.

français Georges Claude (1870-1960). Un demi-siècle plus tard, ce prolixe inventeur fit la démonstration du fonctionnement d'une usine à énergie thermique des mers (ETM). Le principe repose sur une différence de température entre les eaux froides du fond de l'océan, qui ne dépassent pas les 5 °C à 1 000 mètres de profondeur, et les eaux tièdes de surface. Un fluide à très basse température d'ébullition est vaporisé grâce à l'eau tiède de surface. La vapeur ainsi formée entraîne par détente une turbine qui génère de l'électricité. Elle est ensuite condensée grâce à l'eau froide des profondeurs. Pour que le rendement énergétique soit suffisant, une seule condition : l'écart de température doit être égal ou supérieur à 20 °C. C'est pourquoi le développement de cette énergie n'est envisageable que dans la ceinture intertropicale où les eaux de surface se maintiennent au-dessus de 26 °C.

Actuellement, les pays réalisant le plus de recherches sur ces technologies sont les États-Unis, le Japon et la France. Les départements d'outre-mer, en particulier les îles, sont parmi les plus avancées dans ces technologies. Lorsqu'ils ne sont pas artificialisés, les territoires de ces îles sont réservés à l'agriculture. Aussi, le manque d'espace pour déployer des éoliennes ou des centrales solaires contraint les îles à se tourner vers la mer. En Martinique, le pilote industriel *Nemo* (puissance installée de 16 MW) devrait être, à l'horizon 2020, une première porte ouverte vers un éventuel développement industriel de cette technologie. D'après l'industriel qui a été soutenu par un programme européen à hauteur de 72 millions d'euros, 10 MW seront distribués sur le réseau électrique pouvant alimenter 35 000 foyers et le reste servira à la centrale, en particulier pour pomper l'importante quantité d'eau nécessaire à son fonctionnement. Ainsi, maîtriser les effets de l'eau salée et des tempêtes sur les composants structurels, comme les

Copyright © 2017 Editions Quae.

conduites d'eau à gros débit ou les ancrages, constitue son principal défi technique.

Si le premier objectif d'une centrale ETM est de produire de l'électricité, elle réserve d'autres surprises auxquelles Jules Verne n'avait pas songé. En particulier la production d'eau douce à partir de l'eau tiède de surface grâce à un procédé d'évaporation-condensation en cascade. Imaginez que la vapeur utilisée pour enclencher les turbines soit formée à partir de l'eau tiède extraite de la surface de l'océan. En s'évaporant, elle perd son caractère salé, il n'y a plus qu'à la mettre en contact avec l'eau froide tirée des profondeurs pour qu'elle se condense. Une mise en bouteille et l'affaire est pliée ? C'est ce que laissent espérer les centrales ETM en cours de construction. En attendant, on peut continuer à rêver aux autres avantages potentiels de telles usines. Par exemple, l'eau puisée en profondeur pourrait servir à l'aquaculture. Cette dernière piste est sérieusement envisagée car l'eau remontée à la surface est propre et riche en nutriments, facilitant la multiplication du plancton au contact de la lumière. Plancton qui est lui-même à la base de la chaîne alimentaire marine.

Last but not least, l'eau froide des profondeurs sert également à la climatisation : on l'utilise comme réfrigérant pour des machines thermiques ou pour le conditionnement d'air. D'après les premières expériences, cette application permettrait d'économiser environ 80 % de la consommation électrique, généralement utilisée par les générateurs de froid ! La technique est déjà bien maîtrisée et s'est développée à petite échelle en milieu marin, comme à Bora-Bora (Hawaï) où un hôtel de luxe rafraîchit, depuis 2006, ses clients grâce à une climatisation dite SWAC (*Sea Water Air Conditioning*). En dix ans, plusieurs installations de ce type ont été réalisées, notamment en

Copyright © 2017 Editions Quae.

Polynésie et à l'hôpital de Papeete (Tahiti). À Marseille, une centrale inaugurée fin 2016 prélève l'eau de la Méditerranée à 7 mètres pour fournir un nouveau quartier d'affaires en chauffage et climatisation. Avec une capacité de 19 MW, *Thassalia* devrait alimenter, d'ici 2020, 500 000 mètres carrés de bâtiments (bureaux, hôtels, commerces, logements). L'île de la Réunion, qui s'est fixé l'autonomie énergétique d'ici 2030, s'est également lancée dans la course avec un projet visant à couvrir l'ensemble des besoins de ses grands bâtiments (aéroport, hôpital, université) d'ici 2020. Le projet annonce une économie de CO_2 équivalant au rejet annuel de 16 000 voitures. Durée de vie de l'installation : 24 ans. Pour l'heure, malgré le soutien de l'État à hauteur de 90 millions d'euros (la moitié de l'investissement total), le début des travaux a été plusieurs fois repoussé pour des raisons financières. Dans un scénario à longue échéance (vers 2050), quand le mix énergétique aura toute sa place, les freins liés à l'économie de ces technologies récentes devraient s'être desserrés. C'est du moins l'espoir des acteurs du secteur qui s'appuient sur le retour d'expériences des énergies renouvelables à terre. Affaire à suivre…

Autres énergies marines

Dans le tableau de bord des énergies marines renouvelables qui ont fait l'objet de recherches, figure aussi l'énergie osmotique. Bien que l'étude des systèmes d'exploitation de cette énergie soit en *stand-by*, leur principe mérite d'être signalé. Il vise à tirer parti de la différence de concentration de sel entre eaux douces fluviales et eaux marines. Dans un estuaire, l'eau douce migre naturellement vers l'eau salée pour rétablir l'équilibre des concentrations. En plaçant une membrane semi-

Copyright © 2017 Editions Quae.

perméable dans cette zone d'échange, il serait possible de récupérer l'énergie liée à la surpression lors du passage de l'eau à travers la membrane. Cette énergie pourrait ensuite alimenter une turbine hydroélectrique.

Moins étudiés que l'énergie osmotique, mais très séduisants sur le papier, des projets hybrides consistent à utiliser plusieurs énergies marines sur une seule installation. Par exemple, le *Tidal Energy Power* envisagé en Chine est un dispositif combinant énergie potentielle et cinétique par l'entremise d'un barrage en pleine mer. Toujours à l'état de pure prospection, les ouvrages d'art (ponts et tunnels) qui traverseront huit fjords en Norvège lorsque l'autoroute E89 sera construite, pourraient combiner l'énergie des courants et des vagues. Encore plus ambitieux, un prototype mis à l'eau par la *start-up* Geps Techno de Saint-Nazaire qui exploite quatre sources d'énergie. Soutenu par le Pôle mer Bretagne-Atlantique, le *PH4S* est équipé d'une éolienne, une hydrolienne et d'un système houlomoteur et solaire. Il existe également des innovations en phase d'élaboration au sein des laboratoires qui, en 2050, pourraient présenter un intérêt conséquent. On peut mentionner parmi les plus avancés, des dispositifs solaires flottants. Ils existent déjà dans les eaux calmes (lacs et réservoirs) mais émergent tout juste dans le milieu marin. L'adaptation consiste à avoir un matériau à la fois résistant à l'effet corrosif de l'eau de mer et assez souple pour accepter l'agitation de l'eau.

En 2017, aucun déploiement n'est engagé à l'échelle industrielle pour l'une ou l'autre des solutions d'exploitation présentées ci-dessus. Pour autant, le recours à des énergies propres s'impose un peu plus à chaque étude sur le climat. Aussi, des solutions considérées aujourd'hui comme des alternatives risquent, demain, de devenir des nécessités.

Copyright © 2017 Editions Quae.

DES ÉVOLUTIONS POSSIBLES POUR LES ÉNERGIES MARINES

Après les chocs pétroliers des années 70, la France s'est engagée dans le développement des énergies renouvelables. Certains se souviennent, en particulier, de la création du Commissariat à l'énergie solaire, en 1978. Cet établissement a accompagné la construction d'une centrale solaire dans les Pyrénées-Orientales, *Thémis*, et l'émergence de l'entreprise Photowatt, longtemps classée parmi les meilleurs fabricants mondiaux de panneaux photovoltaïques. Mais dans la décennie qui suivit, cet élan s'est essoufflé du fait du coût élevé des énergies renouvelables, d'un manque de stratégie industrielle, du contre-choc pétrolier de 1986 et d'une politique favorable au nucléaire. Seule la vieille tradition française des systèmes hydroélectriques a été maintenue et permet aujourd'hui de couvrir 13 % de la consommation nationale. L'intérêt porté aux énergies marines renouvelables (EMR) actuellement va-t-il déboucher sur un scénario similaire ?

Pour y voir plus clair, il n'est pas inutile de recenser des freins qui limitent encore le développement des EMR. Primo, les conflits d'intérêts : les premières implantations d'éoliennes offshore ont essuyé les pots cassés mais une meilleure concertation des différents acteurs en amont des projets devrait à l'avenir limiter les recours. Secundo, les impacts environnementaux : le suivi des opérations d'installation et de maintenance rendrait acceptable les incertitudes pesant toujours sur ces impacts. Tertio, le coût élevé des énergies marines : il devrait s'effacer pour partie avec les économies d'échelle et les progrès à venir.

Selon les analyses de Bloomberg New Energy Finance, il en coûterait le même prix (18 milliards de livres) pour construire une centrale nucléaire (d'une puissance installée

Copyright © 2017 Editions Quae.

de 3 200 MW) que pour construire un parc éolien offshore (d'une puissance installée de 5 700 MW). Dans les deux cas, l'énergie produite serait de 25 TWh par an… « Une véritable transparence sur les coûts réels de l'ensemble de la filière nucléaire (extraction, exploitation puis démantèlement des centrales, stockage et traitement des déchets) est indispensable pour démontrer que les différentes filières des énergies renouvelables sont de plus en plus compétitives », estime Michel Paillard, ancien chef de projet EMR à l'Ifremer et co-auteur de plusieurs ouvrages. « Par ailleurs, les énergies du passé présentent des risques (accident nucléaire, effets sur la santé…) qui sont minimisés, voire occultés. Cela me paraît invraisemblable de persévérer dans une filière qui utilise un combustible à haute toxicité et qui génère des déchets toxiques très dangereux sur le long terme alors qu'il existe des alternatives. »

Reste un frein majeur, l'intermittence des EMR. Si les énergies marines ont, d'ores et déjà, leur place dans des marchés de niches comme les zones insulaires, leur déploiement plus significatif aurait pour corollaire une révision en profondeur de la gestion du réseau électrique. En effet, celui-ci est basé sur une production électrique stable, continue et maîtrisée, telle qu'en fournissent les centrales à charbon ou nucléaire. Mais, côté mer, les énergies sont intermittentes, à l'exception de l'énergie marine thermique. Se pose alors une question : comment gérer l'absence de vent ou le maintien d'une mer d'huile ? La solution se trouve peut-être dans le stockage de l'électricité et les *smartgrids.*

Les *smartgrids* (réseaux électriques intelligents) combinent deux idées : rendre le réseau existant plus efficace et créer des mini-réseaux dans lesquels on pourra associer différentes sources d'énergie. Cette grille de réseaux serait imbriquée et efficace grâce aux technologies

Copyright © 2017 Editions Quae.

de l'information et de la communication. Dans ce système, la gestion de la demande est un enjeu clé. Jusqu'à présent, le consommateur donnait le tempo au producteur. À l'avenir, les producteurs et distributeurs informeront le consommateur du prix du kilowattheure et de l'état de sa consommation afin qu'il puisse réagir et moduler sa façon d'utiliser les appareils électriques. Par exemple, renseigné sur le meilleur horaire pour faire tourner sa machine à laver dans la journée, le consommateur pourrait décider de reporter dans le temps sa lessive. L'entreprise, l'administration mais également le foyer deviendraient ainsi acteurs de leur consommation. Rien ne garantit que les ménages participeront à cette mutation mais tout le laisse penser : la hausse des prix de l'électricité, la tendance *prosumer*…

Pour pallier l'intermittence des énergies marines, une solution complémentaire s'impose : le stockage de l'énergie. Dans ce secteur en pleine effervescence, de nombreuses technologies sont explorées à base de supraconducteur, d'hydrogène, d'air comprimé, de batterie électrochimique… parmi lesquelles le stockage gravitaire est le système le plus abouti. Il existe déjà plusieurs stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui utilisent le « surplus » d'électricité (produit la nuit par exemple) pour pomper l'eau d'un bassin et la rejeter dans un autre bassin à plus haute altitude. Lorsque la production d'électricité vient à manquer (aux heures de pointe par exemple), le bassin supérieur se déverse dans celui du dessous en activant au passage une turbine. Érigées le long des côtes, certaines de ces stations profitent du fort dénivelé entre la mer et le sommet des falaises comme sur les îles d'Okinawa (Japon) et d'El Hierro aux îles Canaries (Espagne).

L'inventaire des verrous, qu'ils soient technologiques, sociétaux, environnementaux ou économiques, pourrait s'allonger davantage mais disparaît généralement sous les

Copyright © 2017 Editions Quae.

coups d'une volonté politique forte. À moins qu'une énergie décarbonée, moins coûteuse et renouvelable, fasse soudain irruption, tout laisse à penser que la dynamique actuelle, qui s'étend à l'ensemble de la planète, ne peut plus s'enrayer : les énergies marines sont peu polluantes, n'émettent pas de gaz à effet de serre, contribuent à l'autonomie énergétique, promettent l'émergence d'une industrie pourvoyeuse d'emplois, produisent de manière assez régulière tout au long de la journée.

En France, la consommation d'électricité a plus que doublé en 40 ans. Les études prospectives insistent sur le caractère prioritaire de la maîtrise de cette consommation mais soulignent aussi l'importance d'introduire un véritable *mix* énergétique. Elles divergent sur le contenu exact de ce mix : alors que l'Ademe publiait en 2016 une étude démontrant qu'il était possible de passer à 100 % d'énergie renouvelable d'ici 2050, le rapport fourni en 2012 par la Commission énergie sur le paysage énergétique à l'horizon 2050 affirmait que : « […] pour répondre à la demande, il faudra plus de renouvelables, plus de nucléaire, encore beaucoup d'énergie fossile et donc de la capture et de la séquestration du dioxyde de carbone, […]. » Tout dépend maintenant des choix politiques.

Que faire ?

Pour les consommateurs qui souhaiteraient passer à une énergie 100 % renouvelable (mais pas encore marine), contacter Enercoop (www.enercoop.fr/) ou Énergie partagée (www.energie-partagee.org).

Copyright © 2017 Editions Quae.

Conclusion

« L'Océan est une voix. Il parle aux astres lointains, répond à leur mouvement dans sa langue grave et solennelle. Il parle à la terre, au rivage, d'un accent pathétique, dialogue avec leurs échos ; plaintif, menaçant tour à tour, il gronde ou soupire. Il s'adresse à l'homme surtout. Comme il est le creuset fécond où la création commença et continue dans sa puissance, il en a la vivante éloquence ; c'est la vie qui parle à la vie. »

Jules Michelet, *La Mer*, 1861

En 1927, Romain Rolland évoquait un « sentiment océanique » pour désigner la conscience d'appartenir à un Grand tout. Indéniablement, l'horizon marin pénètre l'Homme d'un sentiment d'universalité. Cette ligne bleue qui démarque la mer du ciel n'a pas changé depuis les premiers explorateurs. La mer reste la même à la pointe de l'Afrique, dans le golfe du Mexique ou sur les côtes de l'Eurasie. Serait-ce le paysage immuable ? L'Histoire commune des marins ? Ou alors, la résurgence d'une filiation avec le liquide marin qui a accueilli les premières formes de vie terrestres ? Quoi qu'il en soit, l'humain est particulièrement sensible à la mer. On peut espérer que ce lien singulier saura prévenir l'Homme d'une exploitation inconsidérée de l'océan.

À l'aube du XXIe siècle, après avoir abusé jusqu'à plus soif des ressources de la Terre, l'Homme se trouve acculé à trouver d'autres moyens de subvenir à ses besoins grandissants. L'océan est un territoire encore peu exploré qui regorge de ressources et d'espoirs pour l'avenir. Allons-nous reproduire en mer ce que nous laissons à terre ? Dans ces étendues liquides, trop vastes pour prétendre à une vision d'ensemble, trop profondes pour y voir clair, rien ne transparaît ou si peu. Comment éviter une surexploitation brisant les écosystèmes et spoliant les ressources locales ? Comment éviter la détérioration des océans affectés par le changement climatique ?

Copyright © 2017 Editions Quae.

Les solutions qui existent nous donnent pour horizon en 2050 une meilleure gestion de l'aquaculture, des pêcheries durables, des océans contribuant à une société décarbonée où les ressources marines participeront au développement d'une énergie verte, d'habitations durables, d'une médecine plus ciblée, mais également au transfert des informations numérisées.

Avec le second plus grand territoire maritime à l'échelle mondiale (11,5 millions de kilomètres carrés), répartis sur tous les océans, la France dispose d'un rôle géostratégique de premier ordre et d'un potentiel de ressources marines dont elle n'a pas encore pris pleinement conscience. Gageons qu'avant le milieu du siècle, les Français auront pris cette part active à la transition écologique en s'appuyant intelligemment sur ce patrimoine marin, source de nombreuses opportunités et d'innovations portées par l'ingéniosité de sa communauté scientifique. Directeur de recherches au CESM (Centre d'études stratégiques de la Marine), Cyrille P. Coutansais résume ainsi la situation : « Tout l'enjeu des années à venir réside dans notre capacité à tenir l'étroite ligne de crête entre une mer fragile qu'il faut protéger et une mer qui représente l'espoir de la Terre par ses ressources et leur exploitation. »

D'ici 2050, les organisations internationales auront su encadrer les zones « libres » de l'océan. On peut espérer que l'Homme saura tirer avantage des expériences réalisées à terre pour vivre plus durablement avec la mer. On peut espérer que l'élan mondial de lutte contre le changement climatique soit la manifestation d'une prise de conscience encore plus globale. On peut aussi refuser individuellement de s'engager dans la voie de l'exploitation destructrice et prendre conscience des conséquences de nos actions.

Chaque citoyen est un forgeron de la société de demain parce qu'il choisit ceux qui le gouvernent, mais aussi, sa propre façon de consommer et de vivre. La mer, qui donne naissance au sentiment océanique, porte en elle les germes d'une « action océanique ». Une action grâce à laquelle la mer ne serait pas seulement un territoire à exploiter mais une zone de vie à partager. Sous ces conditions, les citoyens responsables et solidaires pourront transformer la devise portée par René Dubos lors du premier Sommet sur l'environnement (1972) en réalité : « *penser global, agir local.* »

Copyright © 2017 Editions Quae.

« Postface

« Contribuer à la prise de conscience du potentiel et de l'importance des océans pour notre futur »

Originaire de Saint-Malo, mes racines familiales sont imprégnées de vie maritime : charpentiers de marine, constructeurs de doris, marins au long cours, dockers, dirigeants de chantiers navals…. J'ai moi-même rapidement côtoyé le monde maritime grâce au foisonnement d'activités sur les quais de cette cité : la grande pêche comme la pêche côtière, le transport maritime, l'extraction de sable, la construction navale. Une sensibilisation aux exploitations diverses des ressources marines qui sera complétée par la découverte de la biodiversité du littoral et des fonds marins à l'observation des tas de maërl déversés sur les quais par les sabliers de la TIMAC pour ces derniers.

Par la suite, j'ai suivi naturellement une formation en océanographie biologique à l'université de Bretagne occidentale (UBO) avant de m'orienter vers les questions de recherche en appui au développement de l'aquaculture à la station Ifremer de La Tremblade en Charente-Maritime. La conchyliculture des années 1980, marquée par de fortes épizooties et des baisses drastiques de rendement de production, ouvrait la voie aux essais de diversifications par l'utilisation d'espèces exotiques dont la palourde japonaise. Côtoyer les ostréiculteurs pendant des années et leurs aléas de production m'a rapidement amené à travailler sur la compréhension du fonctionnement des écosystèmes marins sous pression humaine. J'ai par la suite appliqué cette première expérience professionnelle en l'élargissant pendant plusieurs années aux recherches sur l'écosystème et la gestion des pêcheries de la baie de Chesapeake en tant que professeur associé à l'université du Maryland (côte est des États-Unis d'Amérique). De façon similaire à l'histoire chaotique des productions françaises, l'huître américaine était à son tour à son plus bas niveau, affectée par la perte d'habitats, les effets de pollutions et d'eutrophisation, la surexploitation et de faibles niveaux de recrutement annuel.

Copyright © 2017 Editions Quae.

J'ai ensuite été recruté par l'Ifremer en 1992 afin de développer des actions de recherche sur le fonctionnement des écosystèmes conchylicoles bas-normands à l'Ifremer de Port-en-Bessin, suivi d'un retour en Charente-Maritime pour diriger successivement les équipes de recherche locales en aquaculture, génétique et pathologie ainsi que la station de l'Ifremer. Ce positionnement m'a amené à développer une vision intégrée de la gestion de la zone côtière en côtoyant directement l'ensemble des acteurs concernés par les enjeux environnementaux comme par le développement de filières économiques. Dans ce domaine, les avis formulés par l'Ifremer en soutien aux politiques publiques sont particulièrement formateurs. Cette expertise amène naturellement à développer des questions de recherche sur les conditions du développement durable caractérisé par ses trois dimensions environnementale, sociologique et économique. Pour moi, ce fut notamment la participation aux groupes de travail internationaux de la Convention Diversité biologique dont le pilotage du groupe sur les interactions « aquaculture-biodiversité » et la définition des objectifs pour cette convention. Mon expérience à l'international s'est prolongée par des expertises pour la NOAA sur le statut de l'huître américaine, l'évaluation d'introduction d'espèces exotiques d'huître aux États-Unis pour l'Académie des sciences américaine mais également différents groupes de travail du Conseil international pour l'exploration de la mer ainsi que des groupes d'experts élaborant des réglementations européennes. À l'échelle nationale, j'ai pu m'impliquer sur le développement de la Fondation Recherche-Biodiversité, structure de coordination des instituts de recherche dans ce domaine de recherche et participé directement au Grenelle de la mer, piloté par le ministre J.-L. Borloo, en tant que rapporteur du groupe de travail sur le développement durable des activités marines. Au-delà de mes activités de recherche, mon positionnement actuel de directeur scientifique adjoint de l'Ifremer me permet d'analyser les grands enjeux en cours portant sur le milieu marin, que ce soit en termes de pressions sur les océans comme le changement global, mais également en termes de sources de développement. Sans pour autant négliger les réels problèmes affectant les océans comme la surpêche, l'acidification des océans ou bien encore le changement global, mon engagement de chercheur est autant d'apporter des connaissances pour orienter les choix des décideurs publiques que de mettre en lumière le potentiel des océans, promesses d'avenir, afin que le public s'engage à leur préservation.

Philippe Goulletquer »

Copyright © 2017 Editions Quae.

Pour en savoir plus

Ouvrages de référence

Andremont A., (Pr.), 2014. *Antibiotiques, le naufrage. Notre santé en danger.* Préface Bernard Kouchner. Éditions Bayard, 250 p.

Cury Ph., Pauly D., 2013. *Mange tes méduses !* Éditions Odile Jacob, 224 p.

Cury Ph., Miserey Y., 2012. *Une mer sans poissons*. Éditions Calmann-Lévy, 279 p.

Desbruyères D., 2010. *Les trésors des abysses*. Préface Gilles Bœuf. Éditions Quæ, collection Carnets de sciences, 184 p.

Fouquet Y., Lacroix D., 2012. *Les ressources minérales marines profondes. Étude prospective à l'horizon 2030*. Éditions Quæ, collection Matière à débattre et décider, 176 p.

Galgani F., Poitou I., Colasse L., 2013. *Une mer propre, mission impossible ? 70 clés pour comprendre les déchets en mer*. Préface Catherine Chabaud. Éditions Quæ, collection Clés pour comprendre, 176 p.

Genevois F., Barbraud C., 2015. *Oiseaux marins. Entre ciel et mers*. Préface Luc Jacquet. Éditions Quæ, collection Carnets de sciences, 200 p.

Girin M., 2012. *Les poissons d'élevage sont-ils stressés ? 80 clés pour comprendre l'aquaculture.* Éditions Quæ, collection Clés pour comprendre, 144 p.

Girin M., Mamaca E., 2010. *Pollutions chimiques accidentelles du transport maritime*. Éditions Quæ, collection Matière à débattre et décider, 160 p.

Goulletquer Ph., Gros Ph., Boeuf G., Weber J. (coord.), 2013. *Biodiversité en environnement marin*, Éditions Quæ, 208 p.

Guézennec J., 2014. *Bactéries marines et biotechnologies*. Éditions Quæ, collection Carnets de sciences, 176 p.

Leclerc V., Floc'h J.-Y., 2010. *Les secrets des algues*. Éditions Quæ, collection Carnets de sciences, 168 p.

Kornprobst J., Laverne C., 2011. *À la conquête des grands fonds*. Préface Jean-François Minster. Éditions Quæ, 176 p.

Lhomme J.-C., 2014. *La guerre des watts. Transitions énergétiques et perspectives*. Éditions Quæ, 176 p.

Mathis P., 2011. *Les énergies. Comprendre les enjeux*. Éditions Quæ, 254 p.

Marchand M., 2013. *L'océan sous haute surveillance. Qualité environnementale et sanitaire*. Éditions Quæ, collection Matière à débattre et décider, 224 p.

Merckelbagh A., 2009. *Et si le littoral allait jusqu'à la mer ! La politique du littoral sous la V*e *République*. Éditions Quæ, 352 p.

Minh-Thu Dinh-Audouin, 2009. *La chimie et la mer : ensemble au service de l'homme*. EDP Sciences, 205 p.

Monaco A., Prouzet P. (sous la dir.), 2014. *Valorisation et économie des ressources marines.* ISTE éditions, collection Mer et Océan, 402 p.

Mosseri R., Jeandel C., 2013. *L'énergie à découvert.* CNRS Éditions, 350 p.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Olagnon M., Kerr J., 2015. *Anatomie curieuse des vagues scélérates*. Éditions Quæ, collection Carnets de sciences, 176 p.

Paillard M., Lacroix D., Lamblin V., 2009. *Énergies renouvelables marines. Étude prospective à l'horizon 2030*. Éditions Quæ, 336 p.

Poirier-Coutansais C. (sous la dir.), 2015. *La Terre est bleue*, Éditions Les Arènes, 186 p.

Tréguer P., Chauvaud L., Amice E., 2013. *La vie sous la glace. Une oasis au pôle Sud.* Préface Laurent Ballesta. Éditions Quæ, 104 p.

Revues

Bellord C., 2015. Chutes de conteneurs à la mer. *La Revue Maritime*, 501, février, 20 p.

Bussi-Copin C., Goy J., 2015. L'ère des méduses. Pourquoi elles vont conquérir les océans ? *Pour la science*, 453, juillet.

Centre d'études stratégiques de la Marine (CESM), 2016. Littoral. *Études marines*, 11, 112 p. Cité de la mer, Cherbourg, 2013. Habiter sous la mer. *Dossiers thématiques*, juillet. 29 p.

Collectif, 2013. Les abysses. *Les Dossiers de la Recherche*, 3, avril-mai.

Collectif, 2015. Spécial mer. *L'éléphant*, hors-série, août, 160 p.

Collectif, 2016. Abysses, *Reliefs*, 1 (1), 200 p.

Lemeteyer C., 2015. L'économie de la grande plaisance. *La Revue Maritime*, 503, octobre, 31 p.

Mangin L., 2011. Les océans. Le nouveau monde de la chimie durable. *Pour la Science*, 73, octobre-décembre.

Poirier-Coutansais C., 2015. La mer : un eldorado fragile. *Études*, octobre, 7-17.

Postel-Vinay O., 2016. Spécial été : L'homme et la mer. *Books*, juillet.

Rey-Valette H., 2014. Quelques pistes sur l'avenir de l'aquaculture française en 2040. Synthèse. *Cahiers Agricultures*, 23 (1), 46 p.

Copyright © 2017 Editions Quae.

Coordination éditoriale et édition : Nelly Courtay
Responsable de la collection : Anne-Lise Prodel
Création maquette intérieure et couverture : Gwendolin Butter
Mise en page : Clarisse Robert – Pagissime

Imprimé en France par CPI Firmin Didot
Dépôt légal : septembre 2017

Les océans, qui n'occupent pas moins de 70 % de la surface du globe, recèlent, comme toutes les îles mystérieuses, des trésors incommensurables. Une rumeur court selon laquelle le fond des océans serait moins bien connu que la surface de la Lune. Pourtant, les scientifiques s'y intéressent depuis toujours mais, jusqu'à récemment, leurs technologies ne permettaient pas d'en percer les secrets. Désormais, ces ressources font l'objet de nombreuses études qui, toutes, tendent à montrer leur potentiel extraordinaire.

Ces promesses surviennent alors que le monde est confronté à des crises environnementales, énergétiques et alimentaires. Dès lors, pourquoi laisser plus longtemps ces vastes étendues inexploitées ? Certains gouvernements et industriels parient sur l'avènement d'une ère vouée aux technologies marines. Déjà, d'imposantes machines sont installées au large pour capturer l'énergie de la mer, des robots commencent à explorer les fonds sous-marins en quête de minéraux, des groupes pharmaceutiques fabriquent des cosmétiques à base d'extraits marins, des îles artificielles flottent à proximité des zones les plus arides. La mer, ce géant intrépide qui faisait trembler les marins et rêver les poètes, fait maintenant courir ses prétendants, les industriels en mal d'une ressource... gigantesque.

Alors prêts à plonger dans cette source de vie pour en découvrir les enjeux ?

Ouvrage préfacé par **Philippe Poupon**, navigateur.

Anaïs Joseph, est géologue de formation et s'est spécialisée, en tant que journaliste, dans le développement durable et l'environnement. Elle a collaboré à la refonte des expositions de la Cité de la mer, à Cherbourg.

Philippe Goulletquer, docteur en océanographie biologique, est en charge des questions de biodiversité marine et côtière à l'Ifremer. Il est membre du conseil scientifique « Patrimoine naturel & biodiversité ».

En couverture : © photo Fotolia 129629207

17 €

ISBN : 978-2-7592-2690-0

9 782759 226900

Réf. : 02600

éditions Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea

www.quae.com