



HAL
open science

A l'origine du vivant

Isabelle C. Biegala

► **To cite this version:**

Isabelle C. Biegala. A l'origine du vivant. Les écosystèmes marins dans la régulation du climat, , 2015. ird-03759291

HAL Id: ird-03759291

<https://ird.hal.science/ird-03759291>

Submitted on 24 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES ÉCOSYSTÈMES MARINS

DANS LA RÉGULATION DU CLIMAT



FONDS FRANÇAIS POUR
L'ENVIRONNEMENT MONDIAL



INFORMATIONS ÉDITION

AUTEURS

Denis Allemand	Catherine Gabrié	Christine Pergent-Martini
Luc Beaufort	Jean Pierre Gattuso	Gérard Pergent
Grégory Beaugrand	Michel Kulbicki	Serge Planes
Isabelle Biegala	Alexandre K. Magnan	Philippe Potin
Gilles Bœuf	Cyril Marchand	Christian Sardet
Charles François Boudouresque	Franck Mazeas	Valérie Stiger-Pouvreau
Chris Bowler	Pierre Mollo	Romain Troublé
Janique Etienne	Claude Payri	Myriam Valero
		Bruno Voituriez

ILLUSTRATRICE

Céline Bricard

Illustratrice, animatrice et enseignante en arts plastiques et arts appliqués, Céline BRICARD vit et travaille à Bagnolet (France). Ses dessins à la mine de plomb, à l'encre et au feutre mêlent le règne végétal et animal. Ses œuvres fourmillent de détails et de respirations, tout en liberté et en poésie. Sa vision d'un monde éphémère et en mouvement traduit une représentation onirique liant intimement les êtres, la nature et le temps.

<http://celine.bricard.free.fr>

REMERCIEMENTS

Tous les auteurs ont gracieusement contribué à cet ouvrage, avec implication et enthousiasme. Nous adressons nos vifs remerciements à : Denis Allemand, Luc Beaufort, Grégory Beaugrand, Isabelle Biegala, Gilles Bœuf, Charles François Boudouresque, Chris Bowler, Janique Etienne, Catherine Gabrié, Jean Pierre Gattuso, Michel Kulbicki, Alexandre K. Magnan, Cyril Marchand, Franck Mazeas, Pierre Mollo, Claude Payri, Christine Pergent-Martini, Gérard Pergent, Serge Planes, Philippe Potin, Christian Sardet, Valérie Stiger-Pouvreau, Romain Troublé, Myriam Valero et Bruno Voituriez. Le FFEM tient à remercier tout particulièrement : Christian Sardet pour ses précieux conseils et son magnifique ouvrage qui a été une source permanente d'inspiration ; Christine Pergent-Martini, membre du conseil scientifique et technique du FFEM, pour sa relecture attentive et ses contributions aux différents chapitres ; Denis Ody pour sa relecture critique de l'encadré sur les cétacés ; Myriam Valero pour ses commentaires et sa contribution sur les macroalgues ; Jean-Pierre Gattuso, pour ses commentaires globaux très pertinents et son introduction au chapitre 3. Enfin, un remerciement chaleureux à l'artiste, Céline Bricard, pour ses aquarelles et encres délicates et colorées.

RÉFÉRENCE POUR CITATION

FFEM (2015). – Les écosystèmes marins dans la régulation du climat.

Fonds Français pour l'Environnement Mondial, Paris, 80 pages.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

François-Xavier Duporge, secrétaire général du FFEM

COORDINATION ÉDITORIALE

Janique Etienne, chargée des projets Gestion du littoral et Haute mer au secrétariat du FFEM

Catherine Gabrié, Consultante en Environnement Marin et Littoral.

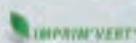
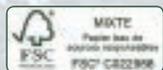
MISE EN PAGE

Coordination : Valérie Fakir, communication FFEM

Conception graphique et réalisation : Arc en ciel

Imprimé par : Pure Impression imprimeur certifié - FSC (FCBA-COC-000077) - Labels : Imprim'vert

Dépôt légal : Novembre 2015



SOMMAIRE

PRÉAMBULE DES PARTENAIRES P4

INTRODUCTION P6-7

OCÉAN, RÉSERVOIR DE CHALEUR, RÉSERVOIR DE VIE P8-9

CHAPITRE 1

ÉCOSYSTÈMES MARINS ET PUIXS DE CARBONE P10-11

A l'origine du vivant P12-13

Le plancton régule le climat P14-15

Diatomées : moteurs de la pompe à carbone P16-17

Coccolithophoridés et neige marine P18-19

Herbiers de posidonies : piliers de la séquestration en Méditerranée P20-21

Mangroves, à la rencontre des eaux douces et marines P22-23

Sous la canopée des grandes algues P24-25

CHAPITRE 2

BIODIVERSITÉ, RÉSILIENCE ET ATTÉNUATION DES IMPACTS P28-29

La biodiversité dans l'océan P30-31

Plancton, champion de la biodiversité P32-33

Services rendus par les herbiers de posidonies P34-35

La mangrove, ligne de défense naturelle des littoraux tropicaux P36-37

Grandes forêts d'algues brunes : écosystèmes protecteurs et nourriciers des zones tempérées P38-39

Récifs coralliens, remparts nourriciers P40-41

La diversité des poissons de récifs P42-43

CHAPITRE 3

CHANGEMENTS GLOBAUX ET DÉSÉQUILIBRES INDUITS P44-45

L'océan, acteur et victime du changement climatique P46-47

Changements climatiques et biodiversité du plancton P48-51

Les herbiers : conséquences possibles du changement global P52-53

Les invasions biologiques P54-55

Les mangroves : entre croissance et régression P56-57

L'évolution des algues sous changement climatique P58-59

Les algues rouges calcaires P60-61

Les coraux : quelques gagnants et beaucoup de perdants P62-63

Les poissons coralliens : des déséquilibres en cascade P64-65

Quand ça chauffe pour la biodiversité P66-67

Conclusion P68-69

Les auteurs et la recherche en France P70-76

Bibliographie P77-80

PRÉAMBULE DES PARTENAIRES

Alors que notre climat change à un rythme sans précédent de mémoire d'homme, l'océan et les littoraux subissent des altérations et changements durables. Si nous concevons depuis longtemps que l'océan joue un rôle fondamental dans la régulation de notre climat, notre connaissance de cette relation intrinsèque est en revanche très récente et doit encore être complétée et partagée.

A l'heure où la compréhension de ces processus devient cruciale et dans un contexte d'insuffisance de cadre juridique contraignant pour la haute-mer, des initiatives et des institutions comme Tara Expéditions et le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) se mobilisent pour impulser des dynamiques de recherche et de développement avec les pays en développement.

Depuis 2003, Tara Expéditions s'est engagé, avec la recherche, dans la collecte de données scientifiques, indispensables pour mieux comprendre l'impact du réchauffement climatique sur les écosystèmes marins ; le FFEM, quant à lui, soutient depuis 20 ans des projets qui concilient préservation de l'environnement mondial et développement des territoires. L'environnement marin a toujours été l'une de ses priorités d'action. Dans le cadre de sa stratégie, il soutient des projets visant à renforcer la résilience des territoires face aux impacts des dérèglements climatiques.

Devant l'évolution des écosystèmes marins, nos engagements respectifs, dans le domaine de l'écologie scientifique et pour une plus grande prise en considération de la gouvernance des océans, révèlent des convictions communes fortes ainsi qu'une logique de coopération évidente.

Les premiers résultats de l'expédition Tara Océans, réalisée entre 2009 et 2013, révolutionnent notre appréhension de la biodiversité microscopique marine et de son évolution en proposant une vision intégrée de l'écosystème planctonique mondial.

Tara Expéditions et le FFEM vont, ensemble, promouvoir une démarche de coopération internationale à travers un projet de recherche scientifique sur le plancton. Cette collaboration va favoriser le croisement entre recherche et enjeux de développement dans les pays du sud ; elle va permettre de mieux appréhender l'impact des changements climatiques sur les populations et sur les migrations d'organismes marins.

Ce programme accompagnera les pays dans leurs prises de décisions en s'appuyant sur une expertise scientifique nationale et alimentera les négociations liées à la gouvernance de l'océan mondial.

En plus d'un hymne à la biodiversité marine, cet ouvrage a pour objectif d'aider les décideurs à mieux comprendre le rôle de la planète bleue dans le climat et l'importance de la prendre en considération dans chacune des décisions politiques de ce XXI^{ème} siècle.

*François-Xavier Duporge, Secrétaire général du Fonds Français pour l'Environnement Mondial
Romain Troublé, Secrétaire général de Tara Expéditions*



INTRODUCTION

Janique Etienne et Catherine Gabrié

L'océan couvre plus de 70% de la surface du globe et représente un volume d'eau considérable, de plus de 1000 millions de km³. Il est un puissant régulateur du climat, et ce depuis les origines.

La chaleur du soleil est distribuée inégalement entre les régions équatoriales et les pôles. L'océan amortit ces variations via les courants océaniques qui redistribuent l'excès de chaleur reçu aux tropiques vers les plus hautes latitudes.

L'océan est aussi un réservoir de carbone : il contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère. Les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et le reste de la planète ont toujours été équilibrés et la teneur atmosphérique en CO₂ est restée constante pendant plusieurs milliers d'années. Depuis l'époque préindustrielle, elle a augmenté de 40% : aujourd'hui les émissions de carbone provenant de l'utilisation des puits de carbone naturels (hydrocarbures, charbon, tourbe) sont estimées à 9 Pg¹ de carbone par an. L'océan compense plus du quart de ces émissions.

Les échanges océan-atmosphère sont contrôlés par deux "pompes" : la pompe de solubilité régie par les équilibres physico-chimiques à l'interface air-mer, fortement dépendante de la température et du brassage océanique, et la pompe biologique, régie par l'activité des écosystèmes marins.

Les organismes marins (algues, plancton, bactéries) et les écosystèmes côtiers (herbiers, algueraies, mangroves, prés-salés) photosynthétiques ont un impact majeur sur la concentration atmosphérique du CO₂. La fixation du CO₂ atmosphérique par des bactéries primitives est d'ailleurs apparue très tôt avant la diversification du vivant. Il y a près de 3,5 milliards d'années, dans une atmosphère primitive chargée de méthane, d'azote et de gaz carbonique, les cyanobactéries ont su tirer leur énergie de la lumière du soleil et fixer le CO₂ atmosphérique pour produire de la matière organique. La photosynthèse permet ainsi de recycler le carbone dans la biomasse des producteurs primaires (cycle court), puis de la transférer aux consommateurs tout au long de la chaîne alimentaire. Une partie du carbone est restituée à l'atmosphère par la respiration et les décomposeurs.

Le phytoplancton est ainsi responsable de plus de la moitié de la production primaire nette (NPP) : 78 Pg de carbone par an. Il est, de ce point de vue, plus important que les plantes terrestres ! Les diatomées représentent une part importante de cette production et sont particulièrement abondantes dans les zones riches en nutriments, hautes latitudes et zones de remontées d'eaux froides.

Les écosystèmes côtiers (incluant herbiers, mangroves et forêts d'algues) représentent quant à eux 10 Pg de carbone par an. La part des macroalgues est importante car elles couvrent de vastes surfaces.

Sur des échelles de temps beaucoup plus longues, des processus tels que l'enfouissement des matières organiques dans les sédiments vont alimenter l'immense réservoir que sont les sédiments et les roches sédimentaires carbonatées et constituer un véritable puits de carbone sur le long terme. En mer, le carbone organique synthétisé en surface est transféré dans les profondeurs sous forme de carbone organique particulaire. Les coccolithophoridés avec leurs écailles calcaires plus denses que l'eau participent à ce piégeage en lestant les agrégats de matière organique. Sur le littoral, les herbiers de magnoliophytes marines, les mangroves et les prés-salés contribuent également à alimenter ce puits de carbone « long terme » ; ils ont une capacité d'enfouissement 180 fois plus élevée que le taux moyen de stockage du carbone en milieu océanique : le manque d'oxygène, nécessaire aux décomposeurs, limite les processus de décomposition et facilite la séquestration du carbone...

La contribution de ces écosystèmes marins à la régulation du climat ne concerne pas que le cycle du carbone. Certains organismes planctoniques, comme les coccolithophoridés, participent à la floculation des nuages en sécrétant des gaz, tels que les diméthylsulfures (DMS). Les grandes algues brunes, quant à elles, secrètent, lorsqu'elles sont stressées, une forme très réactive d'iode qui contribue à la formation de nuages comme les stratocumulus.

¹ 1 Petagramme (Pg) = 1 gigatonne (Gt) = 10¹⁵ grammes



Cet ouvrage traite du rôle des écosystèmes marins et côtiers, dont l'importance dans la régulation du climat est souvent sous-estimée et mal comprise. Ils jouent aussi un rôle dans l'atténuation des impacts des dérèglements climatiques : amortissement de la houle et des vagues, lutte contre l'érosion, atténuation de l'impact des tsunamis. Le plancton dans toute sa diversité, les herbiers en Méditerranée, les mangroves dans les régions tropicales, les récifs et les macro-algues sont à l'honneur.

Au travers de témoignages de chercheurs français, nous avons voulu faire partager notre émerveillement face aux capacités de régulation de ces écosystèmes, à la complexité de leurs interactions et leur biodiversité, qui contribuent à renforcer la stabilité et la résilience de notre planète. Nous avons également souhaité partager nos questionnements face aux changements déjà amorcés : rejet de gaz à effet de serre, augmentation de la température, augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, etc.

Le changement climatique affecte l'océan à différents niveaux : augmentation de la température des eaux océaniques de surface (prévisions de +2 à +4°C d'ici 2100), acidification (avec un triplement de l'acidité prévue pour 2100), élévation du niveau de la mer (environ 1 mètre de plus d'ici 2100). Ces phénomènes, qui se cumulent avec les autres pressions anthropiques, se produisent à des vitesses sans précédent et induisent, même avec de faibles variations des paramètres, de profondes modifications : biodiversité, abondance des populations, répartition géographique, périodes de reproduction seront fortement perturbées. On assiste à une réorganisation globale de la biodiversité, avec un effondrement de la diversité de certains groupes ou au contraire une augmentation de certaines espèces résistantes, à des migrations d'espèces vers les pôles, au remplacement d'espèces par d'autres espèces qui n'offrent pas toujours les mêmes services, à des perturbations dans les relations entre proies et prédateurs, menaçant la chaîne alimentaire.... La calcification des espèces telles que les coraux, est inhibée, risquant d'entraîner en chaîne la perturbation de cet écosystème le plus riche du milieu marin. En Méditerranée, les invasions biologiques induites par l'homme ont déjà complètement transformé les écosystèmes.

La prévision des réponses aux changements est difficile et les effets conjugués des différents facteurs encore mal connus. Les perturbations ne sont pas uniformes et l'on peut s'attendre à des réponses différenciées en fonction des régions, des communautés et des espèces ; les pressions agissent en synergie et s'ajoutent aux pressions humaines, sans que l'on connaisse l'effet de ces synergies. De grandes incertitudes demeurent, mais les bouleversements sont déjà bien réels.

« L'avenir des océans n'est pas écrit, il sera ce que l'on en fera. » Pierre Mollo

OCÉAN, RÉSERVOIR DE CHALEUR, RÉSERVOIR DE VIE

Bruno Voituriez



Passage sud de Fakarava, Polynésie Française

L'océan, qui contient 97 % de l'eau sur Terre, garantit le fonctionnement climatique de la planète. C'est à travers le cycle de l'eau, en effet, que s'effectue l'essentiel des échanges d'énergie entre les différents compartiments planétaires : atmosphère, océan, cryosphère, milieu vivant, continent. C'est grâce à lui que le principal gaz à effet de serre de l'atmosphère, la vapeur d'eau, assure à la Terre un climat bien tempéré. Et c'est lui qui absorbe plus de 90 % du surplus de chaleur produit par l'accroissement de l'effet de serre.

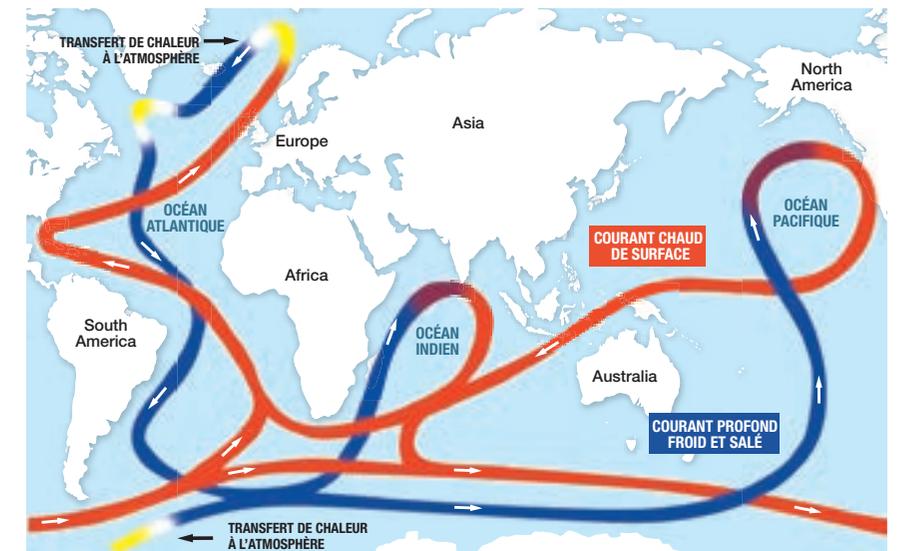
La machine climatique fonctionne grâce à l'énergie solaire, et l'océan en est le principal récepteur : il absorbe près de 60 % du rayonnement solaire qui entre dans le système climatique. L'atmosphère, assez transparente au rayonnement solaire, en absorbe deux fois moins.

L'océan est, de ce fait, un réservoir de chaleur et le principal fournisseur de chaleur (50 %) de l'atmosphère qu'il alimente par conduction et surtout par les processus d'évaporation. L'atmosphère reçoit ainsi l'essentiel de son énergie par le bas, ce qui la « déstabilise » et génère une convection verticale qui la met en mouvement à travers tout un système de grands tourbillons cycloniques et anticycloniques, générés par la force de Coriolis.

L'atmosphère ainsi mise en mouvement va restituer à l'océan, grâce aux vents, une partie de l'énergie qu'elle en a reçue et créer les courants de surface, organisés en systèmes tourbillonnaires à l'image de l'atmosphère.

Tout comme les courants atmosphériques, les courants océaniques transportent la chaleur depuis les zones équatoriales vers les zones polaires. La machine climatique agit comme un système de chauffage central à deux fluides couplés : l'atmosphère et l'océan dont le fonctionnement est assuré par leurs échanges permanents d'énergie cinétique et de chaleur.

Tout ne se passe pas à la surface de l'océan. Les échanges entre atmosphère et océan induisent des modifications de température et de salinité ; les variations de densité qui en résultent produisent une circulation profonde, dite « thermohaline » : les eaux les plus denses plongent, les plus légères remontent.



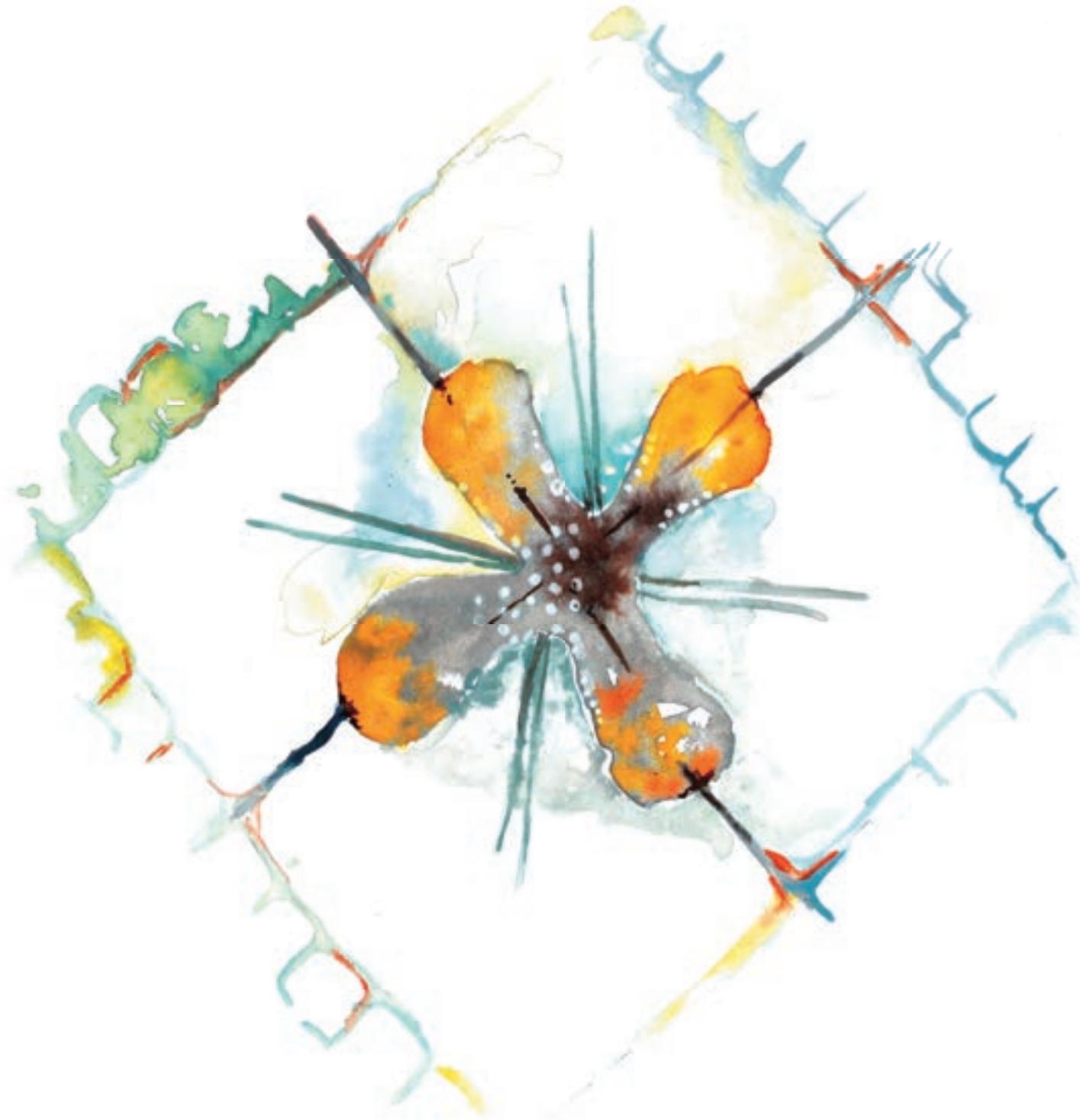
La circulation thermohaline - Source Rapport 2001 du GIEC

Ainsi, en mers de Norvège et du Groenland, les eaux relativement salées de surface se refroidissent et leur salinité augmente encore lorsque la banquise se forme. Elles deviennent plus denses que les eaux sous-jacentes et plongent, créant une circulation en profondeur à travers tout l'océan. Grâce aux mélanges verticaux, ces eaux finissent par remonter en surface et revenir à leur point de départ, via les courants de surface ; gigantesque boucle, que l'on appelle parfois « tapis roulant », et dont les variations modulent les transports de chaleur par l'océan. Le circuit prend plusieurs centaines d'années. Le changement climatique réchauffe les eaux de surface, accroît les précipitations autour de l'Arctique et réduit la banquise. Il est de nature à ralentir cette circulation, donc à limiter les transports de chaleur et modifier les échanges entre l'océan et l'atmosphère.

L'océan et l'atmosphère ne jouent pas du tout aux mêmes échelles de temps. L'atmosphère a la mémoire courte, ce qui rend la prévision météorologique très difficile : l'état de l'atmosphère à un moment donné est complètement indépendant de ce qu'il était trois semaines auparavant. Les perturbations atmosphériques disparaissent en quelques jours, les analogues océaniques (tourbillons de moyenne échelle) vivent plusieurs mois et l'océan, avec la circulation thermohaline, peut garder en mémoire pendant plusieurs siècles la signature d'événements climatiques antérieurs qu'il a enregistrés en surface. Dans le système climatique c'est le partenaire le plus lent, l'océan en l'occurrence, qui impose son rythme à l'évolution climatique.

L'océan n'échange pas seulement de l'énergie et de la chaleur avec l'atmosphère. Il échange également des aérosols, des gaz et notamment des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone. Actuellement, l'océan absorbe globalement entre un quart et un tiers des émissions anthropiques de CO_2 . Mais sa capacité d'absorption n'est pas infinie. Elle dépend de la différence de pression partielle de CO_2 entre l'atmosphère et l'océan, et de la température de celui-ci. L'absorption de CO_2 dans l'océan tend à y augmenter sa pression partielle et donc à réduire la différence de pression partielle avec l'atmosphère, ce qui limite la dissolution du CO_2 dans l'océan. L'absorption du CO_2 dans l'océan diminue avec l'augmentation de sa température ; l'accroissement aujourd'hui constaté de la température de surface de l'océan limite donc de plus en plus les quantités de CO_2 dissoutes dans l'océan. Cette augmentation de température des couches de surface diminue leur densité, accroît la stabilité de l'océan et restreint le transfert de CO_2 vers les couches profondes par les mélanges verticaux. Par ailleurs, les couches profondes de l'océan enrichies en CO_2 finissent toujours, à diverses échelles de temps, par réapparaître en surface où elles ne peuvent que restituer à l'atmosphère le dioxyde de carbone qu'il lui avait soustrait.

L'océan est aussi un réservoir de vie ; les premiers chaînons du réseau trophique, le phytoplancton et le zooplancton, qui conditionnent le développement des niveaux supérieurs et des ressources halieutiques, sont très dépendantes des propriétés physico-chimiques de l'océan (température, salinité, disponibilité en éléments nutritifs) ; propriétés elles-mêmes très dépendantes de la dynamique des océans : courants, mouvements verticaux, mélanges turbulents. Ces propriétés physiques et dynamiques sont aussi à la merci du changement climatique. Si la dynamique océanique impose son rythme à l'évolution du climat, c'est elle aussi qui imposera le sien aux écosystèmes marins.



CHAPITRE 1

ÉCOSYSTÈMES MARINS ET PUIITS DE CARBONE

A L'ORIGINE DU VIVANT

Isabelle Biegala

Il existe des interactions étroites entre le climat terrestre et le vivant et ceci depuis les origines. En étudiant l'histoire de la vie sur Terre, on comprend que l'atmosphère l'a probablement créée et que le vivant n'a pas cessé de modifier cette atmosphère en réaction aux pressions de sélection issues des grandes transitions qu'a subie la Terre. Le vivant s'est adapté aux perturbations en se stabilisant grâce à la spécialisation et à l'organisation.

C'est dans une atmosphère terrestre très chaude et hautement réductrice, chargée en vapeur d'eau, méthane, ammonium et sulfure d'hydrogène que la production de matière organique a-biogénique s'est produite entre 4.5 et 4 milliards d'année, à une époque où la Terre était recouverte par l'océan. L'hydrolyse de ces molécules s'est faite grâce aux UV en permettant la production des premiers acides aminés et nucléiques, dont l'ATP, ainsi que les premiers lipides et carbohydrates. Ces molécules ont formé les ribozymes-peptides, ancêtres des ARNs, capables à la fois de stocker l'information et de catalyser des réactions chimiques au sein d'une double membrane de lipides aux étonnantes propriétés physiques d'auto-croissance et de divisions (I. Cheng, 2006).

Les actions destructrices et combinées des UV et de l'oxygène, issu de l'hydrolyse de l'eau, ont permis la sélection de proto-cellules équipées de molécules plus stables et plus spécialisées, telles que l'ADN et les protéines. Puis, avec un niveau d'organisation plus important, les microorganismes capables de se protéger ont été sélectionnés grâce à la production d'un agent antioxydant et antimutagène, la porphyrine. Cette molécule peut transporter l'oxygène et se protéger des UV en absorbant une partie de leur énergie et en la restituant dans la lumière visible. Ces formidables propriétés ont été mises à profit dans de nombreuses molécules telles que les cytochromes, impliqués dans la fermentation, la respiration et la fixation du CO₂. Les porphyrines entrent également dans la composition de la chlorophylle et de l'hémoglobine (L. Sagan, 1967).

Les recherches de ces dernières décennies ont permis de découvrir chez les Eubactéries, dont les cyanobactéries, et les Archaeobactéries de nombreuses voies métaboliques capables de fixer le CO₂ atmosphérique qu'elles soient phototrophiques, autotrophiques ou non (Hügler and Sievert, 2011; J. Raven, 2009). La plupart de ces « nouvelles » voies métaboliques ont été découvertes dans des environnements aujourd'hui considérés comme extrêmes, tels que les fluides hydrothermaux chauds ou froids, les zones anoxiques, méso et bathypélagiques et les sédiments profonds, qui sont probablement des réminiscences des niches écologiques du début de la vie sur Terre, témoignages des environnements originaux de la vie. La fixation du CO₂ serait donc apparue très tôt, avant la diversification du vivant.

C'est donc dans ces environnements que nous avons le plus de chance de retrouver les descendants directs de nos ancêtres communs (L. Sagan 1967 ; Spang et al. 2015).

La production a-biogénique de la matière organique a pris fin avec le refroidissement de l'atmosphère terrestre et l'apparition du vivant. Les pressions de sélection de ce nouveau climat ont permis à des eubactéries d'hydrolyser l'eau grâce à l'énergie lumineuse, pour produire des molécules d'ATP nécessaires à la fixation du CO₂ et rejeter dans l'atmosphère l'O₂ toxique. Ces cyanobactéries, en « inventant » la photosynthèse oxygénique, ont ainsi recréé au sein de la cellule les mécanismes originels présents dans la première atmosphère. Des preuves de l'existence de ces organismes ont été obtenues en Australie à partir de récifs fossilisés, non coralliens, appelés stromatolithes formés il y a 3.5 milliards d'années (Awramik et Sprinkle. 1999). Ces cyanobactéries étaient filamenteuses, tout comme les nombreuses *Oscillatoriales* actuelles, telles que *Lyngbia* et *Microcoleus* qui forment des matras en piégeant les sédiments, les carbonates et les sels de fer dans leur mucus.

Pendant un milliard d'année les cyanobactéries se sont développées dans une atmosphère réduite et chaude, faiblement oxygénée, riche en CO₂ et en méthane. Puis, il y a 2.4 milliards d'années, la première grande transition chimique de l'atmosphère s'est produite en augmentant considérablement et durablement la concentration en O₂ et en formant la couche d'ozone troposphérique, atténuant ainsi l'impact des UV (Goldblatt et al. 2006).

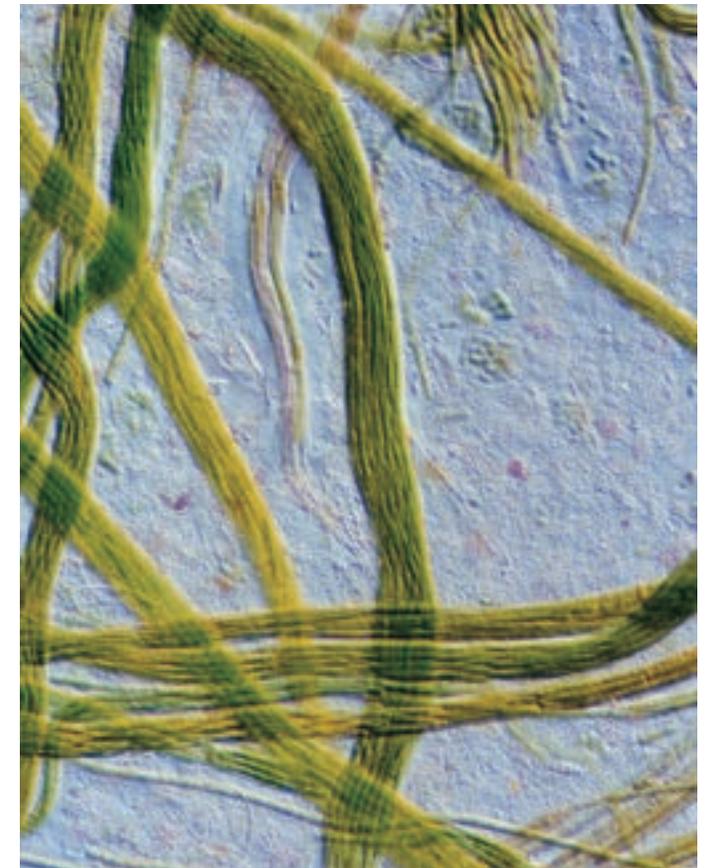
Cette grande transition a eu de nombreuses conséquences sur le vivant et le climat. Pour échapper à cette atmosphère toxique et raréfiée en CO₂, certaines cyanobactéries ont réalisé une endosymbiose avec des unicellulaires flagellés et formé les chloroplastes des premières microalgues eucaryotes ; d'autres ont développé des mécanismes de concentration du CO₂ dans la cellule, afin d'augmenter le rendement photosynthétique.

En diminuant l'effet de serre, la Grande Oxygénation a provoqué un refroidissement progressif de l'atmosphère, qui a eu pour conséquence un changement climatique majeur, celui de la Grande Glaciation de la Terre. Les organismes de la surface ont soit subi des extinctions massives soit, comme certaines cyanobactéries, développé des mécanismes de dormance, sous la pression de sélection et grâce à de puissants antigels, en attendant des conditions plus favorables. La fraction du vivant qui n'a pas eu à s'adapter de façon majeure à ces bouleversements se trouvait dans les zones « refuges » que sont les points chauds et peu oxygénés des grands fonds océaniques.

De puissantes activités volcaniques ont finalement mis un terme à cette glaciation en dégageant du CO₂ et du méthane et reformant un effet de serre. La fonte des glaces en ravivant les sols a apporté d'importantes concentrations de nutriments dont le phosphate, élément limitant ultime de la productivité marine. Certaines cyanobactéries, dites diazotrophes, ont levé les limites en azote en fixant le diazote atmosphérique (N₂) sous forme d'ammonium directement assimilable par la plupart du vivant, et entraîné une véritable explosion de vie marine et terrestre telle qu'en témoigne la période Cambrienne d'il y a 530 millions d'années.

Depuis cette période, la Terre a subi cinq autres grandes transitions, où le climat s'est rapidement modifié suite aux changements soudains de la concentration en gaz à effet de serre. Le volcanisme en a souvent été l'origine, suivi d'augmentations spectaculaires de la biomasse et de la productivité du vivant pour se terminer en événements anoxiques majeurs, poursuivis par des périodes glaciaires, avec pour conséquence de grandes extinctions.

Les cyanobactéries ont montré d'incroyables capacités d'adaptation à toutes ces phases de transitions. Aujourd'hui, au travers des chloroplastes des plantes terrestres et marines ou des micro-algues procaryotes et eucaryotes, elles contrôlent les concentrations en oxygène dont dépendent le reste du vivant ainsi que notre climat. Elles sont à l'origine des 2 poumons de la planète.



Cyanobactérie filamenteuse *Microcoleus* (Mexico)
Source NASA : spacesscience.arc.nasa.gov/microbes/gallery

Les propriétés de diazotrophie et de symbiose de certaines cyanobactéries sont souvent mises à profit par les microalgues et les plantes aquatiques et terrestres pour en augmenter la productivité primaire. Ainsi la cyanobactérie *Richelia* endosymbiotique de la diatomée *Rhizosolenia* permet le développement d'efflorescence marines, et les cyanobactéries filamenteuses *Microcoleus* et *Lyngbia* développent soit des mucus riches en azote sur les pneumatophores des mangroves, soit vivent en association avec les thalles et racines des phanérogames marines.

LE PLANCTON RÉGULE LE CLIMAT

Christian Sardet

Plancton et climat, deux mots que l'on ne pense pas aller ensemble ; l'un, plancton, désigne la multitude des êtres qui se laissent dériver au gré des courants, l'autre, le mot climat, englobe l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère.

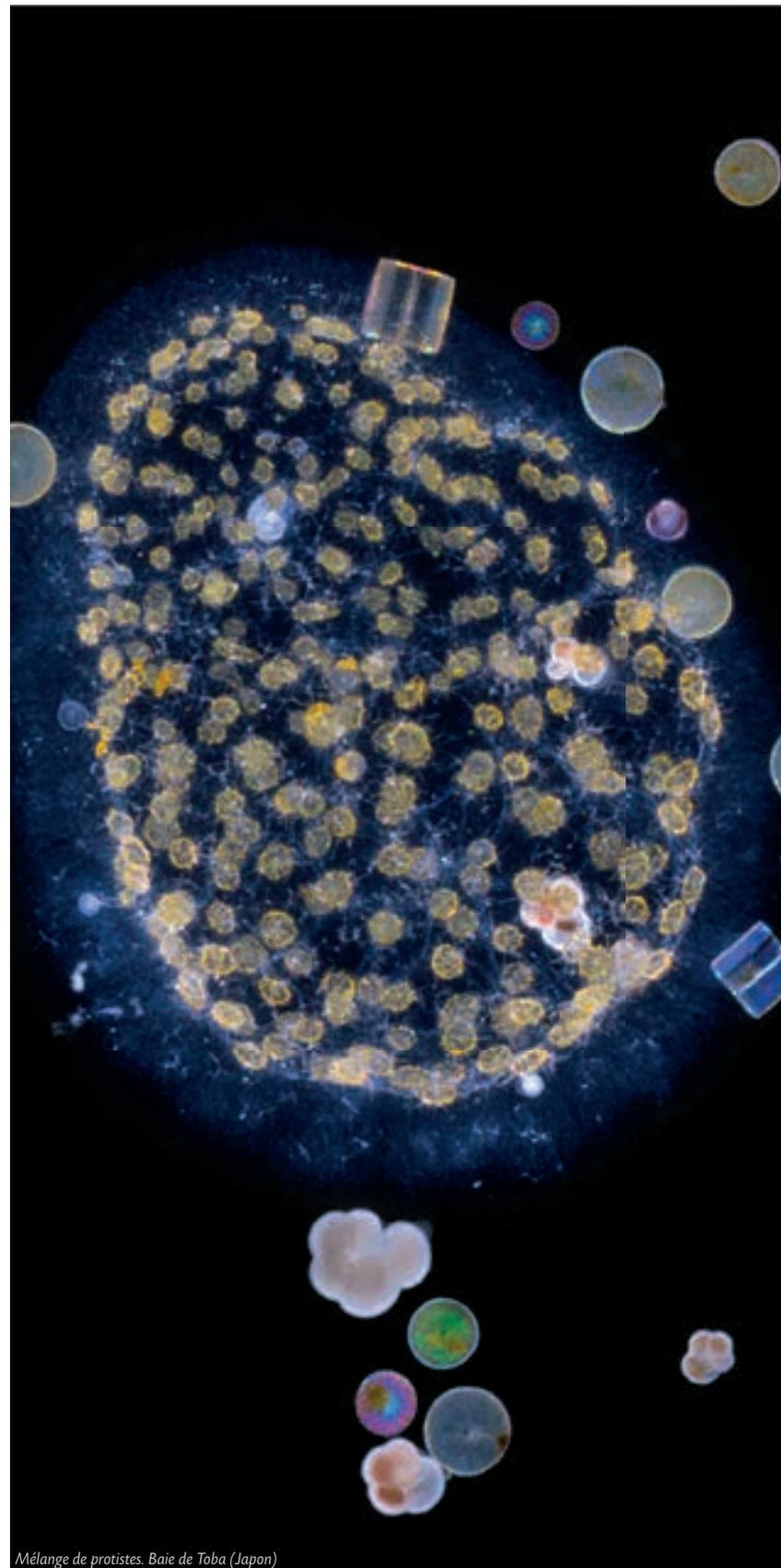
Plancton, atmosphère et climat sont irrémédiablement liés et cela depuis les premières traces de vies sur la planète. Cette histoire commence il y a plus de 3 milliards d'années, quand des films de cyanobactéries photosynthétiques – tirant leur énergie de la lumière du soleil – ont commencé à injecter l'oxygène (O_2) dans une atmosphère primitive qui en était dépourvue, et à fixer le gaz carbonique (CO_2) atmosphérique. Ces êtres microscopiques – bactéries, archées puis leurs chimériques descendants, les protistes – ont produit la matière organique et vivante à la base de la chaîne alimentaire et initié un processus d'évolution foisonnant menant jusqu'à nous. Ces êtres invisibles sont aussi à la source de l'accumulation de la matière organique au fond des océans devenue pétrole et gaz – nos combustibles fossiles. L'accumulation de coques et squelettes microscopiques a généré d'innombrables sédiments au fond des océans devenus falaises et montagnes.

Au-delà de leur rôle nourricier et malgré leurs tailles infinitésimales, les organismes du plancton capables de photosynthèse – le phytoplancton – sont de grands régulateurs du climat par leur capacité à fabriquer de la biomasse, absorbant et régulant ainsi le CO_2 atmosphérique. En fin de vie, la matière organique sédimente sous forme de cadavres, détritiques et déjections devenus des écosystèmes riches de bactéries et archées, nourrissant les créatures des abysses. Depuis des millions d'années, cette « neige marine » emmène au fond des océans une gigantesque quantité de carbone. L'ensemble du processus constitue la "pompe à carbone". Les organismes uni- et multi-cellulaires qui se fabriquent des coques et des squelettes en carbonate de calcium ont également un impact sur ce bilan carboné. Chaque jour, nous devrions ainsi remercier le plancton de réduire les augmentations de CO_2 atmosphérique et de température et de maintenir la planète habitable.

Nous savons depuis les années 1980 que le plancton joue d'autres rôles vis-à-vis du climat et en particulier à travers la production de composés volatiles – tel le sulfure de diméthyle et ses sous-produits. Ces molécules sont à l'origine d'aérosols impliqués dans la nucléation des gouttelettes d'eau et la dynamique de formation des nuages. La couverture nuageuse atténue l'effet de réchauffement des rayons lumineux et régule le régime des pluies et les ressources d'eau douce. Plus généralement le plancton du fait de ses multiples activités biochimiques, est au cœur des cycles du carbone, de l'azote et du phosphate ainsi que de la mobilisation du calcium, de la silice et de bien d'autres minéraux. L'écosystème planctonique est ainsi parti intrinsèque de l'équilibre géochimique des océans.

Chez les cellules qui peuplent les océans et entre ces cellules, tout est question de rythmes et d'interactions mutuelles. Divisions, émission de signaux, d'attractants et toxines, cycle des symbioses et des parasitismes conditionnent la croissance et la prolifération des bactéries, des protistes et des organismes qui les consomment.

Au point de parfois causer des proliférations aussi gigantesques que brèves de quelques espèces dominantes visibles depuis les satellites. Contrastant avec les lents écosystèmes terrestres, les changements rapides des populations de phytoplancton dans les océans sont suivies de près par des proliférations de ceux qui les mangent – les planctons animaux et leurs larves : le zooplancton – créant une danse perpétuelle entre prédateurs et proies.



Mélange de protistes. Baie de Toba (Japon)

Cette « danse du plancton » est d'une importance capitale pour la composition de l'écosystème planctonique. C'est cet assemblage dynamique d'organismes qui conditionne l'efficacité de la pompe à carbone, les émissions d'aérosols et au final, l'équilibre du climat. Une croissance de phytoplancton locale est en général synonyme d'absorption du CO_2 au point que certains apprentis sorciers ont même commencé à faire des expérimentations sauvages de relargage de tonnes de fer dans l'océan pour stimuler artificiellement la croissance d'un plancton considéré comme un serviteur et potentiel sauveur de notre climat.

Depuis le début de la révolution industrielle l'homme a brûlé assez de charbon, de pétrole et de gaz pour envoyer dans l'air 250 milliards de tonnes de carbone provoquant une augmentation de CO_2 dans l'atmosphère – de 250 ppm à 400 ppm en 200 ans. Chaque année, un quart des émissions anthropogéniques, 2 milliards de tonnes de CO_2 , sont ajoutés aux océans à travers la surface d'échange avec l'air soit 70% de la surface de la planète.

L'individu moyen envoie chaque jour de 1 à 4 kg de CO_2 dans les océans. Ce n'est pas sans conséquence...

En effet le climat, en retour, influe sur le plancton et la vie dans les océans. Sans parler des zones côtières pauvres en oxygène dont la propagation semble être directement favorisée par l'augmentation des températures. Le CO_2 dissout dans l'eau change irrémédiablement son pH – la mesure de concentration des ions H^+ – augmentant l'acidité des océans qui est encore alcalin (pH autour de 8). Les 120 milliards de tonnes absorbés par les océans depuis les années 1800 ont produit une baisse du pH de 0.1 soit une augmentation d'acidité de 30%. Plus inquiétant encore, cette acidification se produit à un rythme qui n'a pas eu d'égal au cours des 300 millions d'années précédentes. Et même si nous arrêtons toute émission, l'océan continuerait de s'acidifier au moins jusqu'en 2050, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre océans-atmosphère s'établisse. Or les processus de calcifications qui sous-tendent la formation des coquilles et des squelettes des êtres vivants sont extrêmement sensibles au pH. Les premiers affectés seraient les coraux et mollusques benthiques ou planctoniques, les protistes foraminifères et coccolithophores, ou larves planctoniques. N'oublions pas non plus tous les animaux dont les organes d'équilibration – les otolithes – dépendent de la présence de grains calciques.

On peut légitimement s'inquiéter de cette situation. Le passé a connu d'importantes augmentations de CO_2 qui ont provoqué des extinctions de vie. Il y a 50 millions d'années, sur une période de 1000 à 10 000 ans, la transition paléocène-éocène a été provoquée par une augmentation considérable du CO_2 – 8 fois ce que nous avons relâché dans l'atmosphère – et la température est montée de 10 degrés dans l'Arctique. Les sédiments appauvris en fossiles et squelettes et coques en carbonate de calcium montrent que ce fut une hécatombe. Là encore, pour la survie des êtres vivants, tout est question de rythme, de vitesse et de capacité d'adaptation à des changements rapides de l'environnement et de l'écosystème.

Alors que dire ? Soyons honnête, au rythme où nous continuons à consommer et polluer, nous ne savons pas de quoi l'avenir sera fait. Il a été publié dans l'une des meilleures revues que le phytoplancton avait diminué de 40% en un siècle, mais ces interprétations basées sur des mesures grossières de la turbidité de l'eau – les seules dont nous disposons pour évaluer le phytoplancton entre 1870 et 1970 – sont controversées. Des milliers de bouées et d'engins font le yoyo dans les océans et envoient journalièrement vers les satellites d'innombrables mesures. Ces mesures de températures et de bien d'autres paramètres physico-chimiques, optiques et biologiques (les pigments photosynthétiques) seront prochainement complétées par des identifications de gènes et d'organismes permettant probablement de prédire localement l'intensité de la pompe à carbone. Comme pour la météo, les supercalculateurs nous donneront chaque jour un état de la productivité des océans et de ses contributions dans la course au maintien des gaz à effet de serre – CO_2 , méthane, protoxyde d'azote – dans une zone de concentration qui permette la survie.

DIATOMÉES : MOTEURS DE LA POMPE À CARBONE

Chris Bowler

Les diatomées sont des eucaryotes photosynthétiques unicellulaires qui font partis du groupe d'algues le plus riche en espèces : elles ont conquis la plupart des habitats aquatiques depuis leur diversification majeure il y a environ 65 millions d'années (Bowler *et al.*, 2010). Elles jouent aussi un rôle majeur dans le fonctionnement de l'écosystème mondial, notamment dans les cycles biogéochimiques de la silice et du carbone (Tréguer et De La Rocha, 2013; Field *et al.*, 1998) et sont aussi considérées comme les organismes les plus importants de l'océan par leur contribution, via la photosynthèse, à la production de presque autant d'oxygène que les forêts tropicales (environ 20% de la production primaire nette globale).

Grace à leurs parois siliceuses lourdes, elles sont également considérées comme les principales actrices de la pompe biologique de carbone, car les diatomées mortes ou mourantes génèrent un flux net vertical de carbone à l'intérieur de l'océan, qui peut être stocké sur de longues périodes géologiques (Falkowski *et al.*, 2005; Smetacek 1985 & 1998).

Groupe de phytoplancton le plus adapté aux environnements turbulents, les diatomées dominent généralement les systèmes de remontées d'eau, par exemple au large de l'Afrique et de l'Amérique du Sud (Margalef, 1978). Les blooms saisonniers des algues, comme au printemps dans l'Atlantique Nord, sont typiquement dominés par les diatomées. Les énormes extensions de chlorophylle en surface de l'océan sont visibles depuis l'espace !



En réalité, la plupart des diatomées sont présentes jusqu'à environ 50 mètres de profondeur, dans une couche appelé le « Deep Chlorophyll Maximum », où il y a suffisamment de lumière pour la photosynthèse et de nutriments pour soutenir leur croissance.

Les diatomées ont eu une histoire évolutive complexe et, comme d'autres Chromalveolates, sont soupçonnées d'être dérivées d'une endosymbiose secondaire impliquant à la fois les algues vertes et rouges combinées avec une cellule hôte eucaryote hétérotrophe (Moustafa *et al.*, 2009). Ces divers facteurs leur ont laissé de nombreuses capacités métaboliques nouvelles, y compris un cycle de l'urée entièrement fonctionnel et un mécanisme de couplage énergétique entre les chloroplastes et les mitochondries qui ne ressemble guère aux métabolismes d'autres organismes photosynthétiques (Allen *et al.*, 2011, Bailleul *et al.*, 2015). En outre, leur paroi cellulaire rigide les a contraintes à acquérir un mode inhabituel de division cellulaire. Celui-ci comprend une régression de la taille des cellules filles mitotiques dérivées jusqu'à ce qu'elle atteigne un seuil critique. Pour la restauration de leur taille, elles doivent être soumises à la reproduction sexuée (Lewis, 1984; Chepurnov *et al.*, 2004).



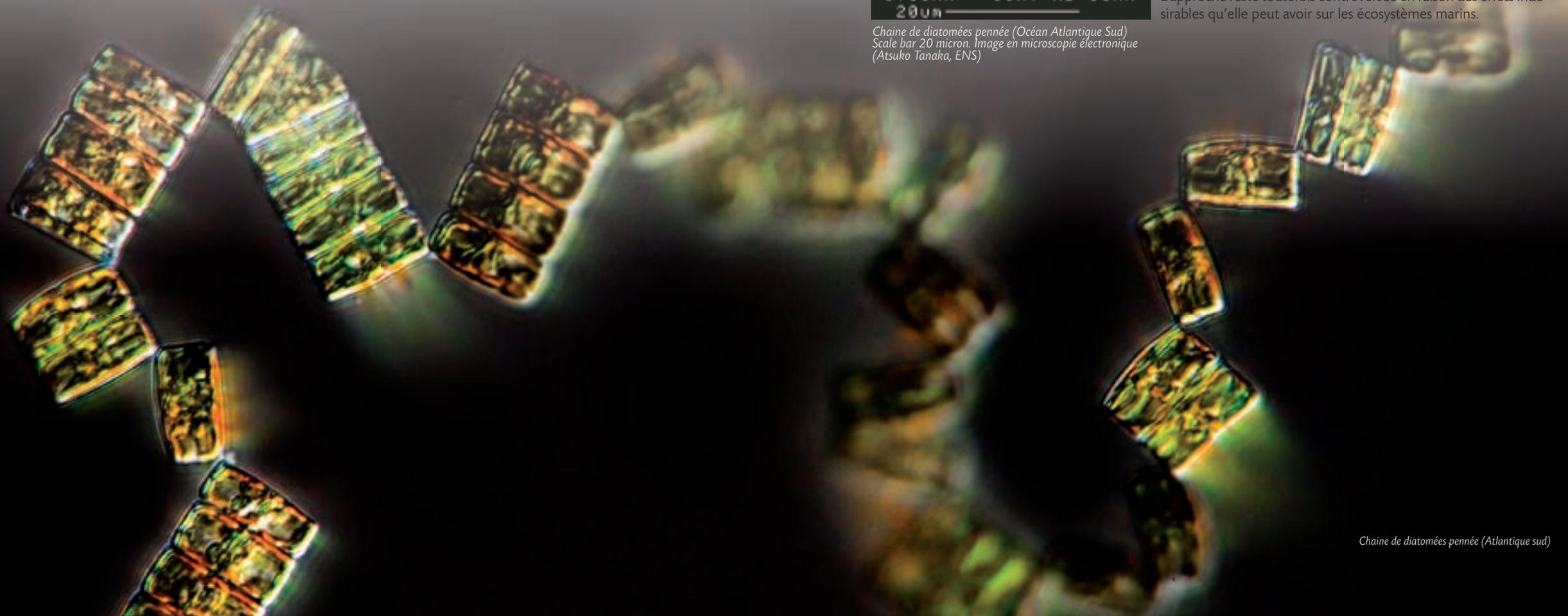
1.15kX 15kV WD:10mm
20µm

Chaîne de diatomées pennée (Océan Atlantique Sud)
Scale bar 20 micron. Image en microscopie électronique
(Atsuko Tanaka, ENS)

La caractéristique la plus spectaculaire des diatomées est leur paroi cellulaire à base de silice finement structurée connue sous le nom frustule. Ces parois cellulaires présentent une étonnante variété de formes et de motifs spécifiques de l'espèce. L'ancienne biomasse des diatomées était un contributeur majeur aux combustibles fossiles, et les diatomées d'aujourd'hui sont étudiées en tant que source de carburants renouvelables neutres en carbone, ainsi que pour d'autres applications en biotechnologies, nanotechnologies et technologies environnementales (Gordon *et al.*, 2009; Nassif et Livage, 2010; Fields *et al.*, 2014).

La reconnaissance de l'importance des diatomées dans le cycle du carbone a conduit à l'idée d'encourager l'intensification du piégeage du Carbone. Le fer étant l'un des éléments nutritifs limitant dans de grandes parties des océans, la fertilisation en fer pourrait conduire à la prolifération des diatomées. Des expériences à grande échelle semblent indiquer que cela pourrait fonctionner, bien que beaucoup plus de recherche soit nécessaire...

L'approche reste toutefois controversée en raison des effets indésirables qu'elle peut avoir sur les écosystèmes marins.



Chaîne de diatomées pennée (Atlantique sud)

COCCOLITHOPHORIDÉS ET NEIGE MARINE

Luc Beaufort



Les coccolithophoridés forment un groupe de phytoplancton étonnant. Ces organismes unicellulaires flottant au large à la surface des océans, produisent de minuscules écailles calcaires qu'ils disposent autour de leurs cellules afin de se protéger de la prédation.

Leur taille minuscule étant inférieure à la taille minimale des mailles des filets à plancton classiques en toile (20µm), ils ont longtemps été ignorés des études écologiques. Ils sont cependant très abondants comme le montrent leurs efflorescences facilement détectées par satellites.

Cette abondance est telle que depuis 220 millions d'années, ils produisent une part importante des roches sédimentaires marines : par exemple ils composent l'essentiel de la craie de Normandie. D'ailleurs leur nom signifie « porteurs de graines de pierre ». Non seulement ils occupent une place importante dans l'écologie pélagique en tant que producteur primaire, mais ils jouent un rôle de stabilisateur climatique pour trois raisons :

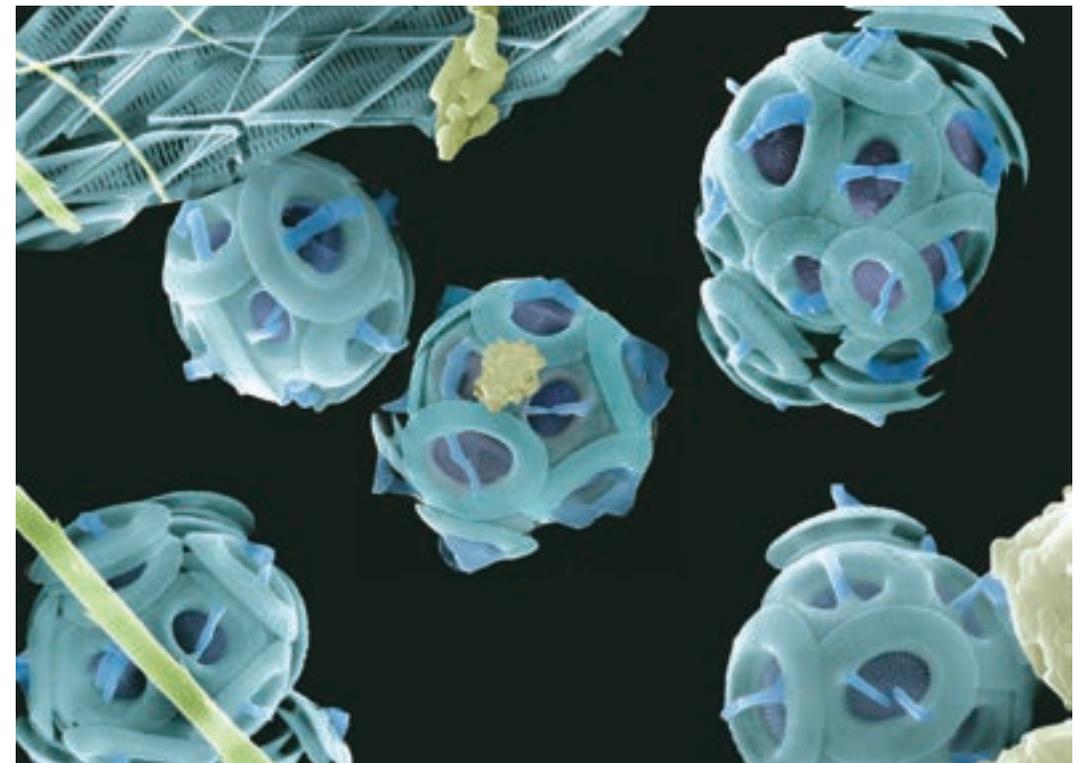
Ils appartiennent au groupe des Haptophyceae qui produisent une grande partie du dimethylsulfoniopropionate DMSP, qui une fois transformé en DMS (Dyméthylesulfide) s'évapore dans l'atmosphère. Les DMS participent alors à la nucléation des gouttelettes d'eau à l'origine des nuages. Les coccolithophoridés permettent donc la formation de nuages ! La théorie scientifique de GAIA de James Lovelock avait pris cet exemple des coccolithophoridés pour expliquer la relative stabilité des climats de notre planète depuis 220 millions d'années : quand la terre se réchauffe, les coccolithophores produisent plus de DMS et donc il y a plus de nuages, ce qui provoque alors un refroidissement. Les deux phénomènes s'équilibrent vers un climat idéal.

Les écailles calcaires, les coccolithes, lestent les agrégats de matière organique marine (neige marine et pelotes fécales) produits en surface. La densité de ces écailles est nettement supérieure à celle de la matière organique, qui, elle, est proche de celle de l'eau. Sans ce lest, la matière organique marine n'aurait que peu de chance de couler vers le fond marin et de s'enfouir dans les sédiments. C'est pourtant par ce moyen qu'une grosse partie du carbone produit sous forme de matière organique sort du système climatique, ce qui empêche l'atmosphère de s'enrichir trop en dioxyde de carbone, limitant ainsi l'effet de serre. Les coccolithophoridés participent donc au piégeage du carbone dans les fonds océaniques.

Enfin pour sécréter les coccolithes, les coccolithophoridés utilisent le bicarbonate et le calcium de l'eau de mer et le transforment en carbonate de calcium et en dioxyde de carbone. Donc lors de la sécrétion de leur carapace de calcaire, ils produisent du dioxyde de carbone, ce qui participe à une augmentation de l'effet de serre dans l'atmosphère. Bien entendu ce ne sont pas les seuls à le faire. Notamment les coraux, les mollusques produisent aussi une grande part du calcaire marin participant ainsi à la production de dioxyde de carbone de l'atmosphère. Mais ces derniers organismes produisent ce calcaire en mer peu profonde. En période glaciaire, à cause de la baisse du niveau marin, les surfaces océaniques où ils vivent diminuent considérablement.

Seule la production de calcaire au large, essentiellement faite par les coccolithophoridés, permet de maintenir un effet de serre acceptable par la diffusion de dioxyde de carbone vers l'atmosphère. Avant l'apparition des coccolithophoridés, il y a 220 millions d'années les phases glaciaires furent beaucoup plus sévères.

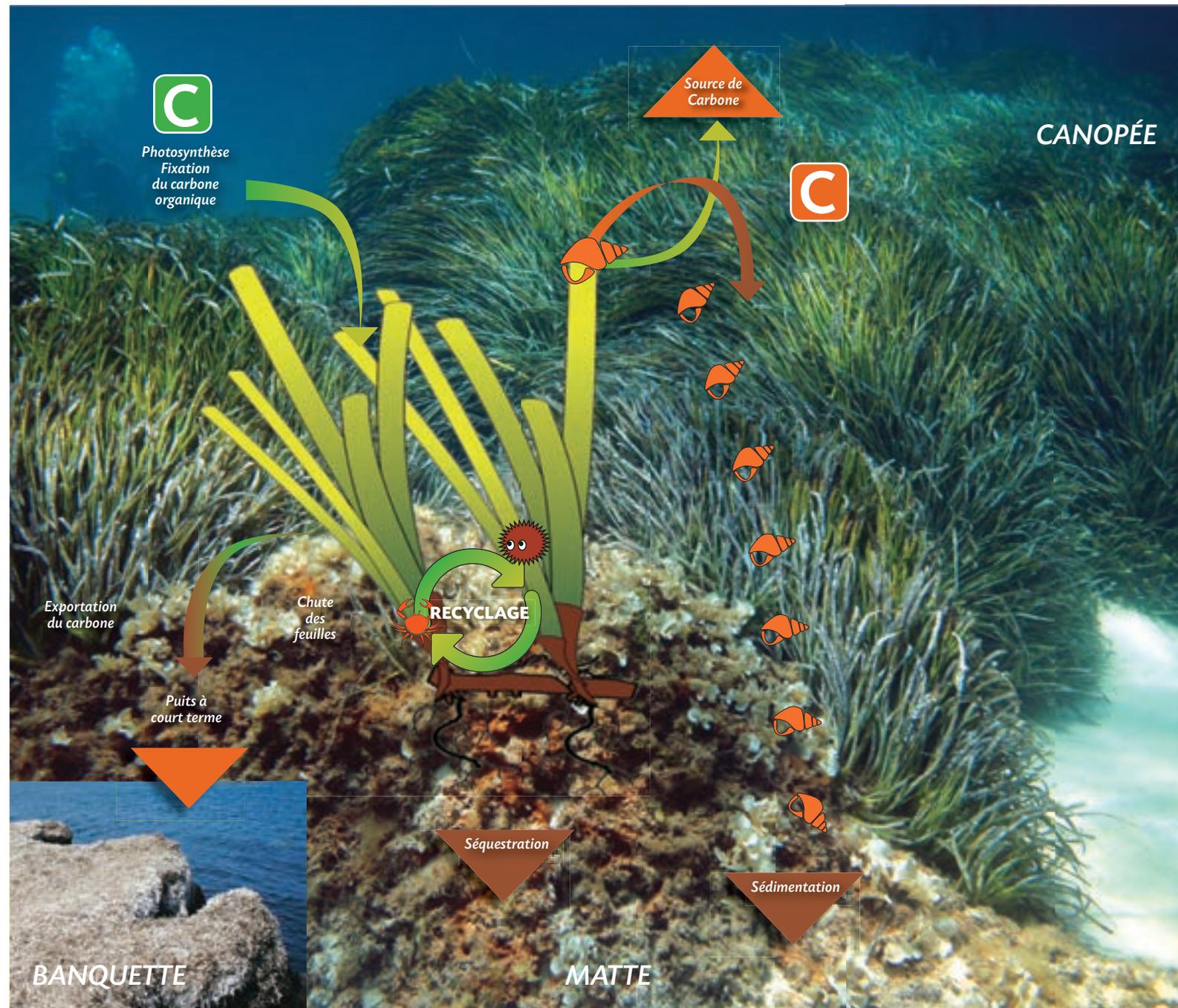
Les coccolithophoridés sont donc des organismes importants pour les climats. Ils sont aussi une source de matière organique marine immense. Ils constituent à la surface des océans l'équivalent de vastes steppes herbeuses. Ils sont ainsi à la base d'un écosystème très vaste couvrant une surface supérieure à celle de tous les continents réunis.



Coccolithes colorés pêchés au nord de la Papouasie Nouvelle Guinée

LES HERBIERS DE POSIDONIES : PILIERS DE LA SÉQUESTRATION EN MÉDITERRANÉE

Christine Pergent-Martini



Principaux flux de carbone au sein de l'herbier de Posidonies (d'après G. Pergent)

Les herbiers de magnoliophytes marines, les mangroves et les prés-salés jouent un rôle important dans la régulation du climat au regard de leur capacité de fixation du carbone atmosphérique (Nellemann et al., 2009). Ces formations, qui sont parmi les plus productives de la planète, ont une capacité de stockage du carbone 180 fois plus élevée que le taux moyen observé en milieu océanique (Nellemann et al., 2009).

Les magnoliophytes marines sont un groupe de plantes à fleurs (une soixantaine d'espèces au niveau mondial), largement distribuées à l'échelon planétaire (présentes sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique), qui forment de vastes herbiers dans les eaux superficielles (jusqu'à 40 m de profondeur environ). Ces formations seraient responsables de 40% du carbone fixé chaque année par la végétation côtière, avec des variations en fonction de l'espèce et des conditions environnementales (Laffoley and Grimsditch, 2009). Selon des estimations récentes, ces écosystèmes pourraient stocker entre 4,2 et 8,4 Pg¹ de carbone par an (Fourqurean et al., 2012). Aussi, même si elles n'occupent que de faibles surfaces à l'échelon planétaire (de l'ordre de 1% des océans), ces magnoliophytes jouent un rôle important en zone côtière et fournissent des services écosystémiques de grande valeur (Costanza et al., 1997). Parmi ces magnoliophytes marines, seules quelques espèces (e.g. *Thalassia* spp. et *Posidonia oceanica*) constituent des espèces climaciques, qui se propagent lentement et constituent d'importantes réserves de carbone (Bjork et al., 2008).

La Posidonie (*Posidonia oceanica*), espèce endémique de Méditerranée, est très fréquente sur le littoral français. Constituée d'un faisceau de cinq à huit feuilles rubanées, de 40 à 80 cm de haut et d'un centimètre de large, disposé à l'extrémité d'un rhizome dressé, elle édifie des structures très particulières, appelées « mattes ». Ces structures sont constituées par l'enchevêtrement des rhizomes peu putrescibles et des racines, plus ou moins colmaté par les sédiments, piégés par les faisceaux foliaires. Ces mattes peuvent se conserver pendant des millénaires et atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (Boudouresque et al., 2012). A l'instar des autres magnoliophytes marines, les herbiers de Posidonies présentent une production primaire élevée, qui peut être évaluée en moyenne, à la profondeur intermédiaire de 15 m, à 116 +/- 29 g de carbone par m² et par an (Pergent et al., 2014). Chez cette espèce, on peut donc identifier un « puits » de carbone à court terme (mécanismes de minéralisation intervenant entre 2 à 6 ans après l'enfouissement des feuilles), qui s'observe également chez les autres espèces de magnoliophytes, mais aussi un « puits » à plus long terme (séquestration au sein de la matte sur plusieurs décennies, voire quelques millénaires). La part du carbone qui rejoint le puits à long terme (séquestration) est estimée en moyenne à 27% du carbone total fixé par la plante. En tenant compte de la superficie, occupée par les herbiers de Posidonies en Méditerranée (environ 35 000 km²), la quantité de carbone ainsi séquestrée pourrait atteindre 1.09 Tg¹ de carbone par an (Pergent et al., 2012), faisant de l'écosystème à Posidonies une « anomalie » en terme de capacité de stockage du carbone au sein des magnoliophytes marines (Fourqurean et al., 2012).

Cette propriété exceptionnelle s'explique, pour partie, par la canopée luxuriante des herbiers (avec une densité qui peut atteindre plus de 1 000 faisceaux par m² pour des herbiers en bonne santé, dans les eaux les plus superficielles), qui réduit la circulation de l'eau, favorise la sédimentation, diminue la remise en suspension de toute la matière organique particulaire et l'aération des sédiments. Ceci entraîne une augmentation du taux d'enfouissement et l'apparition de mécanismes d'anaérobiose dès les premiers centimètres du sédiment, qui ralentissent le processus de re-minéralisation. Si l'on ajoute à cela le caractère réfractaire des tissus de Posidonies à la dégradation (notamment des parties enfouies dans le sédiment, composées principalement de lignine et de cellulose), les conditions de mise en place d'un « puits » de carbone à long terme efficace (taux d'entrée significatif et pertes réduites) sont donc réunies. En prenant en compte l'épaisseur moyenne de la matte (de 1 à 4 m), le carbone stocké en Méditerranée, par les herbiers de Posidonies, représenterait de 11 à 42% des émissions de dioxyde de carbone produites par les pays méditerranéens, depuis le début de la révolution industrielle.

¹ Pg : Pétagramme = 10¹⁵g - Tg : Teragramme = 10¹²g

MANGROVES, À LA RENCONTRE DES EAUX DOUCES ET MARINES

Cyril Marchand



Mangrove de la forêt de Moindou (Province sud de la Nouvelle Calédonie)

Lieu de rencontre des eaux marines et des eaux douces terrestres, la mangrove est un ensemble d'arbres, d'arbustes et d'herbiers se développant dans la zone de balancement des marées en région tropicale. Le mélange de ces eaux, associé à une forte évapotranspiration, induit une large gamme de salinité qui conduit à une zonation de la mangrove, zones plus ou moins distinctes, parallèles au trait de côte, chacune dominée par une espèce végétale différente. Cette zonation des mangroves se manifeste souvent comme une mosaïque qui varie suivant les interactions physiques, biologiques et chimiques qui s'établissent entre plante et substrat dans une zone donnée.

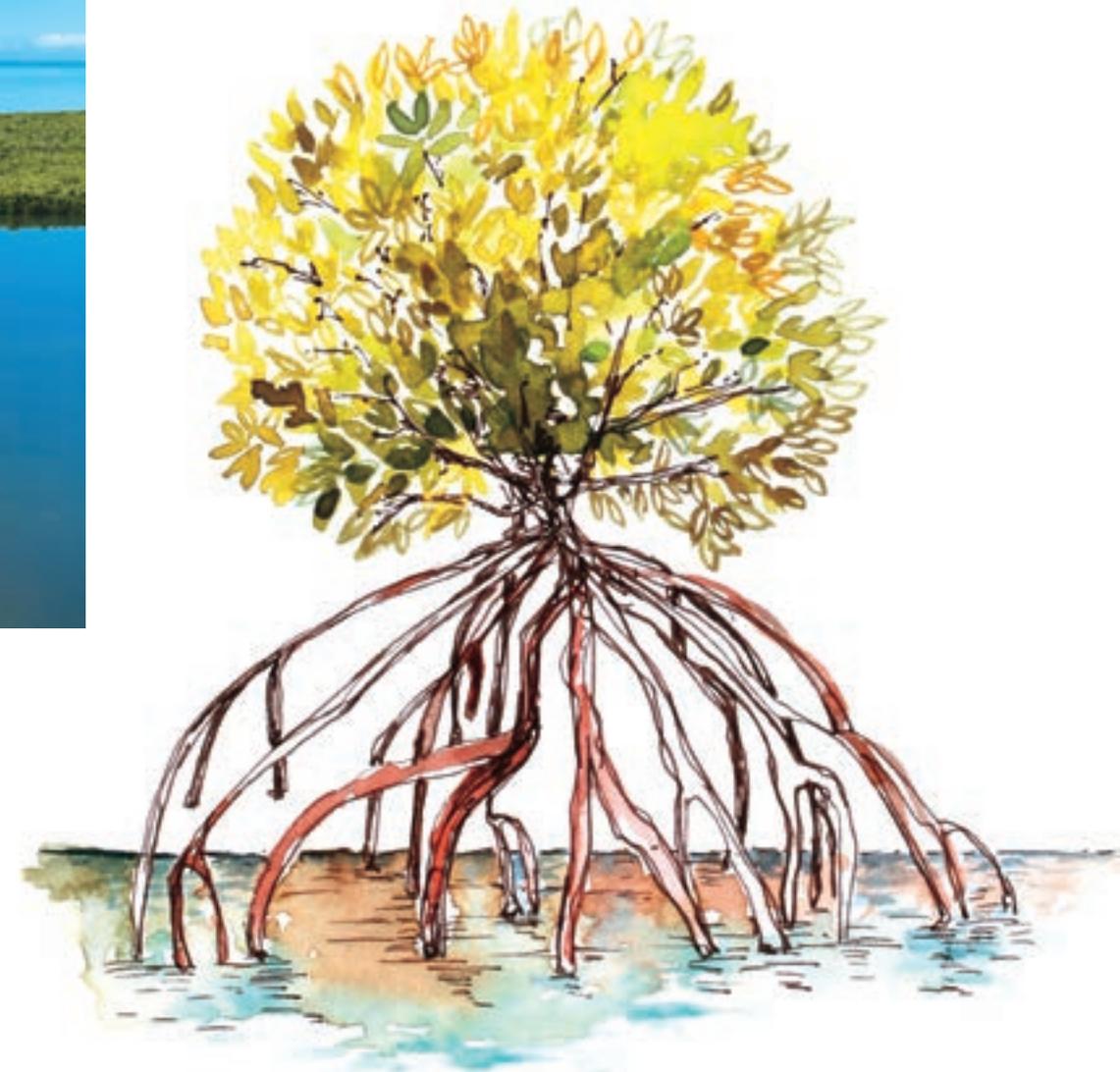
Cet écosystème joue un rôle fondamental dans le cycle du carbone, bien que le bilan carbone de la mangrove (sols, végétation et eau) reste encore mal connu. Si la globalité de l'écosystème est un puits de CO_2 , certains de ses compartiments (sols et eau) peuvent fonctionner comme une source de CO_2 . La capacité de la mangrove à transformer le CO_2 atmosphérique en matière organique via la photosynthèse est très forte : la fixation a été estimée à 218 TgCyr^{-1} (soit 50 t CO_2 équivalent/ha/an) avec une grande variabilité suivant les régions. Différents facteurs contribuent à cette productivité de l'écosystème, tels que le climat de la région et les apports en nutriments.

Outre la fixation, le stockage de carbone dans les sols de mangrove est particulièrement important, estimé à environ $18,4 \text{ TgCyr}^{-1}$ (environ 10 t CO_2 équivalent/ha/an) ; ces sols sont en effet gorgés d'eau et les processus de décomposition des débris végétaux, qui forment la litière, y sont très lents en raison du manque d'oxygène nécessaire aux décomposeurs (bactéries et champignons). Plus la mangrove est proche de l'océan, plus son sol est gorgé d'eau, et moins la production de CO_2 est importante, augmentant ainsi sa capacité à être un puits pour ce gaz à effet de serre.

L'espèce *Rhizophora*, le palétuvier rouge, caractérisée par ses grandes racines échasses, est très productive et se développe bien en front de mer ou sur les berges des rivières et donc sur un sol très souvent gorgé d'eau, faisant de cette espèce un emblème pour le piégeage et le stockage du CO_2 atmosphérique.

Au sein du cycle du carbone, la production de la matière organique, résultat de la réduction du CO_2 atmosphérique par les plantes lors de la photosynthèse, permet de fixer le CO_2 , tandis que la décomposition de la matière organique produit des gaz à effet de serre (H_2O , CO_2 ou CH_4). Par conséquent, si la photosynthèse est un puits pour les gaz à effet de serre, la décomposition de matière organique en est une source.

Les découvertes récentes en Nouvelle-Calédonie montrent que les micro-algues qui recouvrent la surface sédimentaire réduisent les flux de CO_2 des sédiments vers l'atmosphère, accroissant ainsi la quantité de carbone piégée dans la mangrove.



SOUS LA CANOPÉE DES GRANDES ALGUERAIES

Claude Payri

Les écosystèmes dominés par les macroalgues sont omniprésents dans les habitats côtiers sous toutes les latitudes, depuis les forêts de laminaires ou les grandes forêts de kelp, dont la canopée traverse toute la colonne d'eau, jusqu'aux récifs coralliens où dominent les espèces calcaires, en passant par les algues à Fucales (sargasses) qui forment une canopée sous la surface de l'eau. Les forêts et champs d'algues se développent le long des littoraux rocheux et occuperaient près de 58 000 km de linéaire côtier depuis les hautes latitudes jusqu'aux régions tropicales et subtropicales et couvriraient selon les auteurs de 0,6 à 1,4 millions de km² (Suzuki, 1997 ; Duarte and Cebrian, 1996) soit 9 % de la surface des océans (IUCN, 2009).

Les forêts de macroalgues ont un taux de production primaire et de renouvellement très élevés (jusqu'à 10 fois par an) et sont parmi les écosystèmes les plus productifs au monde (Gao and McKinley, 1994). La production globale des forêts de kelp serait estimée à 20 millions de tonnes de carbone par an pour une bande côtière de 500 m (Reed and Brzezinski, 2009) et à 39 millions de tonnes de carbone par an en incluant les zones profondes (Graham et al., 2007; Reed and Brzezinski, 2009). La production nette des macroalgues représenterait 68% de la production des écosystèmes dominés par les macrophytes (macroalgues, herbiers, et prés salés) et environ 74% du carbone séquestré par les zones marines côtières (Duarte et al., 2005 ; Muraoka, 2004).

Contrairement aux herbiers de phanérogames ou aux forêts de mangroves, il n'y a pas d'enfouissement de matière organique sous la canopée des grandes algues ; la matière organique s'accumule peu dans la litière, car les débris sont rapidement consommés par les herbivores, décomposés et recyclés par les bactéries, ou exportés vers d'autres écosystèmes.

Ainsi, le carbone est en bonne partie stocké à court terme dans la biomasse vivante en place et bien que la contribution réelle au stockage à long terme dans les réservoirs de carbone soit mal connue (Laffoley and Grimsditch, 2009), il est admis que les forêts de macroalgues forment des puits de « carbone bleu » significatifs.

La séquestration dans les sédiments ou autres réservoirs de carbone océaniques, dépend de l'efficacité avec laquelle les débris algaux sont sédimentés, plutôt que consommés ou exportés, ce qui représente une faible proportion de la biomasse. La capacité de séquestration du carbone par les macroalgues est donc directement liée à la biomasse algale et aux conditions environnementales nécessaires à leur développement (IUCN, 2009).

Ainsi de nombreuses études mettent en avant la capacité des macroalgues à réduire les gaz à effets de serre, et le développement de l'algoculture est présenté à la fois comme une solution pour la fixation du CO₂ et, dans une moindre mesure, la séquestration du carbone (Chung et al. 2011).

L'IODURE ACCUMULÉ DANS LES GRANDES ALGUES BRUNES INFLUENCE LE CLIMAT CÔTIER

Philippe Potin

Dans les milieux marins comme terrestres, les organismes vivants libèrent des Composés Organiques Volatils (COV) comme moyen de défense face à des agressions multiples de type biotique ou abiotique qui impactent la chimie de l'atmosphère et participent à l'effet de serre (Ormeno & Potin, 2012). Cependant, dans les années 2000, l'importance d'un composé inorganique libéré par les grandes algues brunes de type laminaires, l'iode moléculaire (I₂) volatil, a été révélée comme majeure pour les émissions de gaz à effet de serre en milieu marin côtier, dix fois plus importantes que l'émission des COVs bromés et iodés (McFiggans et al., 2010).

Les laminaires sont en effet connues comme les accumulateurs d'iode les plus performants sur terre et ont longtemps constitué l'unique source de cet antiseptique largement utilisé dans le domaine de la santé (Leblanc & Potin, 2010). Lorsque ces algues sont stressées, soit parce qu'elles sont exposées au soleil et à la déshydratation à marée basse, ou qu'elles subissent une attaque par des pathogènes comme les bactéries, les virus ou les champignons, elles génèrent des radicaux libres comme l'eau oxygénée (peroxyde d'hydrogène) susceptibles de causer des dommages cellulaires. Pour contrecarrer cet effet négatif du stress oxydant, les algues relâchent rapidement des ions iodures qui vont détoxifier le milieu pour former de l'I₂ volatil grâce à des enzymes spécifiques de l'oxydation de l'iodure, se protégeant ainsi du vieillissement cellulaire induit par les radicaux libres (Küpper et al., 2008, Verhaeghe et al., 2008). Sous l'effet de la lumière (photolyse), I₂ se dissocie en radicaux I[•], une forme très réactive d'iode qui se complexe avec l'ozone de l'air en particules nanométriques, qui condensent ensuite la vapeur d'eau menant à la formation de nuages comme les strato-cumulus (McFiggans et al., 2010).

Plus largement, ces mécanismes originaux impliquent d'autres grandes algues brunes comme les *Fucus spp.* et *Ascophyllum nodosum* sur les côtes de l'Atlantique-Nord qui découvrent tous les jours à marée basse émettant plus faiblement, mais plus longtemps que les laminaires, et qui jouent donc aussi un rôle essentiel dans le cycle bio-géochimique de l'iode sur Terre et dans la destruction de l'ozone dans la basse atmosphère (Huang et al., 2013). Avec le réchauffement des océans, quel sera l'impact de la régression des peuplements de grandes algues brunes sur ces phénomènes ? Difficile de le prédire avec la précision des modèles actuels !



Groupe de cachalots (côte ouest de l'île Maurice)



Les cétacés dans l'écosystème marin

Dans les eaux froides où ils s'alimentent, les grands cétacés jouent un rôle non négligeable dans le cycle du carbone.

Ils se nourrissent dans les profondeurs et remontent respirer à la surface, où ils libèrent des panaches de matières fécales riches en macronutriments (en particulier l'azote) et micronutriments comme le Fer, qui stimulent la photosynthèse et la croissance du phytoplancton.

La présence de certains nutriments est souvent un facteur limitant de la croissance du phytoplancton, comme par exemple dans l'océan Austral (Antarctique) où les teneurs en Fer sont particulièrement faibles : pour croître, le phytoplancton a besoin de lumière (il se développe à la surface des océans, dans la zone photique), de dioxyde de carbone (CO₂) mais également de divers nutriments. Les sources de nutriments sont diverses : l'atmosphère, les fleuves, ou encore les remontées d'eaux océaniques profondes, très riches en nutriments.

Une étude de l'université de Flinders (Australie) a pu mettre en évidence le rôle des grands cachalots dans la stimulation de la production primaire dans l'océan Austral (Trish et al., 2015) ; la population de cachalots, estimée à 12 000 individus, y enrichit la zone photique à hauteur de 36 tonnes de Fer/an. Cet enrichissement serait responsable de l'équivalent de 400 000 tonnes de Carbone exportés par an vers les profondeurs océaniques tandis que la respiration des cachalots en produit 160 000. Le bénéfice net est donc de 240 000 tonnes de carbone exportées.

Ils contribuent ainsi à la "pompe à carbone biologique".

A leur mort, les grands cétacés redescendent une dernière fois vers le plancher océanique et leurs carcasses représentent un important réservoir capable de séquestrer le carbone.

Joe Roman, biologiste et co-auteur d'une étude de l'Université de Vermont (Roman et al., 2010), souligne l'importance des baleines dans l'équilibre des écosystèmes marins, et parle d'un "tapis roulant" baleinier des profondeurs vers la surface.

Selon ces chercheurs, les cétacés de grande taille, baleines à fanons et cachalots, ont certainement joué un rôle encore plus important par le passé, avant que leurs populations ne soient décimées par la chasse commerciale. Depuis l'arrêt de la chasse commerciale, certaines populations ont montré des signes de restauration, mais elles subissent néanmoins les impacts négatifs du changement global : réchauffement, compétition sur la ressource, pollution, et trafic maritime qui double tous les 20-25 ans.

Baleine à bosse (Archipel des Australes, Polynésie)



CHAPITRE 2

BIODIVERSITÉ, RÉSILIENCE ET ATTÉNUATION DES IMPACTS

LA BIODIVERSITÉ DANS L'OcéAN

Gilles Bœuf

L'océan constitue le plus grand espace de vie de la planète et recouvre à l'heure actuelle 70,8 % de la surface de la Terre. Mais il faut en fait beaucoup plus penser l'océan en volume (de l'ordre de 1 370 millions de km³). Sa profondeur moyenne est autour de 3 800 m et la principale caractéristique de ce gigantesque milieu est sa continuité, donc sa connectivité. L'autre trait particulier est, par rapport au reste des eaux libres sur la planète, sa salinité. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 grammes de sel par litre, 1050 mOsm. l⁻¹) et la composition de l'eau océanique est la même partout, et ceci depuis des dizaines de millions d'années (Ma). Sa troisième caractéristique est donc sa stabilité.

La biodiversité ne saurait être assimilée à une simple liste d'espèces peuplant un écosystème particulier, elle est considérablement plus qu'un catalogue ou un inventaire. C'est en fait tout l'ensemble des interactions établies entre les êtres vivants, et avec leur environnement. Nous pouvons la définir simplement comme étant la fraction vivante de la nature. Elle est issue d'une chimie pré-biotique, bâtie sur une géo-diversité antérieure, et elle s'est diversifiée dans l'océan ancestral vers 3 900 millions d'années (Ma). Des cyanobactéries sont parties à la conquête généralisée de l'océan vers 3 400 - 3 200 millions d'années (Ma), alors sans aucun oxygène atmosphérique. Grâce aux pigments spécifiques des cellules, et en présence d'eau, la photosynthèse produit de l'oxygène et des sucres à partir de la lumière et du dioxyde de carbone (CO₂) et serait apparue vers 3 500 Ma. L'oxygène a ensuite commencé à diffuser hors du milieu aquatique, la composition de l'atmosphère actuelle avec ses 21 % d'oxygène datant d'environ 100 Ma, au Crétacé.

Les conséquences physiques des « flux » osmotiques (eau et électrolytes, « sels ») en environnement marin, dus à la salinité, ont conduit le vivant à deux types de stratégies pour l'osmorégulation (régulation de l'eau et des sels) : les espèces qui ont la même pression osmotique (« salinité ») dans leurs tissus internes que celle de l'eau de mer, et celles qui régulent leurs tissus en étant moins concentrés (les poissons osseux par exemple). Ceci les contraint à ingérer sans cesse de l'eau en mer et à très activement excréter des sels.

La biodiversité marine est bien particulière. La diversité spécifique reconnue dans l'océan ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 250 000. Ceci est peu et peut être lié à deux raisons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les microorganismes, bactéries et protistes divers, ne sont encore que très partielles : nous sous-estimons donc considérablement la biodiversité océanique. Pour tous les procaryotes (bactéries) et les très petits eucaryotes (protistes, levures micro-algues et micro-champignons), les approches moléculaires apportent chaque jour des connaissances étonnantes. La navigation circumocéanique de Tara Océans nous a très récemment fourni des informations précieuses et extraordinaires (Science, vol 348 n° 6237 de mai 2015) sur l'abondance et la variété des virus, bactéries et protistes (peut-être plus de 700 000 nouvelles espèces découvertes ?). Par ailleurs, et c'est la seconde raison, il est aussi clair que les écosystèmes marins et le mode de vie dans un milieu continu (à travers la dispersion des cellules sexuelles et des stades larvaires) des espèces qui les peuplent, prédisposent moins à l'endémisme strict (on vit ici, localisé, et nulle part ailleurs) que dans les biotopes terrestres. Il existe beaucoup plus de barrières et d'isolats favorables à la spéciation (processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent) sur terre qu'en mer. Ceci entraîne des différences importantes en matière de diversité spécifique, les niches écologiques marines au large n'atteignant pas la richesse des terrestres, beaucoup plus morcelées et favorisant beaucoup plus les spéciations nouvelles. Il y a beaucoup moins d'espèces connues en mer mais beaucoup plus de groupes ancestraux variés que sur les continents. Aujourd'hui, par exemple, 12 phyla animaux sont exclusivement marins et n'ont jamais quitté l'océan (échinodermes, brachiopodes, chaetognathes...). La stabilité de l'océan ouvert, au moins depuis 100 millions d'années, est aussi tout à fait extraordinaire : pH (il n'a que très peu varié depuis 36 Ma), pression osmotique et salinité, température, pressions hydrostatiques liées à la profondeur, contenus en gaz dissous...

Les activités humaines sont en train de changer cela : par exemple, pour l'acidification de l'océan, il est 30 % plus acide sur 250 ans !

Si cette stabilité est moins génératrice d'espèces nouvelles, par contre, les biomasses marines peuvent être considérables et la seule performance du phytoplancton dans sa capacité à se renouveler peut dépasser les 50 % de la productivité biologique de la planète. Initialement la vie fut exclusivement marine, avant les sorties massives, plusieurs fois, en différents endroits, sous différentes formes, de l'océan vers 440 Ma pour les métazoaires « élaborés ». La grande crise d'extinction Permien/Trias jouera un rôle primordial avec 96 % de disparition d'espèces, tant marines que continentales vers 252 Ma. L'explosion des espèces de plantes à fleurs, des insectes et de beaucoup d'autres groupes sur Terre vers 130-110 Ma fut déterminante après les radiations (explosions du nombre d'espèces à partir d'une seule, ancestrale) initiales dès le Dévonien puis surtout le Carbonifère (345 Ma). La coévolution entre plantes et pollinisateurs, l'apparition d'une infinité de nouvelles niches ont souvent été proposées pour expliquer l'accélération de la spéciation dans les environnements continentaux à cette époque. Il est également clair que les phénomènes de dispersion des produits sexuels et des larves en mer jouent un rôle considérable dans la répartition des espèces et la biogéographie actuelles. Si sur terre il n'est pas rare de trouver des espèces vivant sur quelques km², nous ne connaissons pas d'exemples d'espèces aussi confinées dans l'océan. La très grande variété des modes de reproduction en mer tire aussi parti des phénomènes de dispersions dans les masses d'eau, mâle et femelle n'étant pas toujours contraints d'être proches ! Ainsi, connectivité et variations bien plus faibles des facteurs environnementaux créent elles la grande stabilité de l'océan au large et des caractéristiques bien spécifiques de la biodiversité qu'il abrite. Les systèmes côtiers, intermédiaires avec de fortes influences terrigènes sont eux soumis à des variations bien plus grandes et se rapprochent plus des « stratégies » terrestres. L'environnement marin a donc joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie et l'océan actuel garde son rôle primordial dans l'évolution de la vie et du climat.

À partir de cette biodiversité, les humains pêchent depuis des temps ancestraux, certainement des centaines de milliers d'années. Dès qu'ils sont parvenus sur des rivages, ils se sont mis à collecter des coquillages, des algues, à piéger des poissons... Comme en agriculture et dans les milieux continentaux, l'humain s'est aussi mis à élever certaines espèces marines sur les littoraux et ceci depuis au moins 4 000 ans (Egypte, Chine...). L'exploitation des ressources vivantes aquatiques renouvelables est en plein essor, mais avec de sérieuses inquiétudes sur sa durabilité. Les chiffres disponibles de la FAO en 2013, pour l'année 2012, donnent des valeurs de 79,9 millions de tonnes (Mt) pour les pêches maritimes, 11,5 Mt pour les pêches continentales, 19 Mt pour les algues et 65,6 Mt pour l'aquaculture, soit un total, tout confondu pour tous les groupes et tous les milieux aquatiques, d'environ 176 Mt. Phénomène lié au réchauffement de la masse d'eau, les stocks halieutiques remontent en moyenne de 72 km vers le nord tous les 10 ans dans l'hémisphère nord et la surpêche mondiale est très préoccupante : on a extirpé de l'océan entre 50 et 90 % de tous les grands individus des poissons pélagiques en 15 ans ! Les trois quart de tous les stocks sont pleinement exploités ou surexploités (29 %). L'aquaculture est en plein essor mais pose toujours les questions d'impacts environnementaux (destruction des milieux littoraux et pollutions), de transplantations d'espèces et, pour certains types d'activités, d'usage de protéines animales dans l'alimentation des espèces d'intérêt (elles sont carnivores). En plus de ces ressources vivantes, l'océan compte aussi de l'ordre de 25 000 molécules d'intérêt pharmacologique ou cosmétique tirés d'espèces marines et d'extraordinaires et forts pertinents modèles pour la recherche scientifique et les applications biomédicales ou agronomiques qui en découlent. La phagocytose, les molécules clés de la cancérisation ont été découvertes grâce à des oursins et étoiles de mer, les bases moléculaires de la mémoire grâce à une limace de mer, le choc anaphylactique grâce à une méduse, la transmission de l'influx nerveux grâce au nerf de calmar...

Le phytoplancton océanique stocke également du CO₂ dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcalcificateurs. Les transports océaniques redistribuent chaleur et salinité, ces deux effecteurs contrôlant grandement la machine climatique. La quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et dans l'océan augmente. Les températures moyennes de l'air de la couche inférieure de l'atmosphère (près de la surface du globe) et de la surface de l'océan sont en hausse. Et le niveau moyen des mers se relève depuis la fin de la dernière ère glaciaire. Cette remontée du niveau de la mer constitue une inquiétude croissante pour les populations littorales. Les changements rapides de la composition chimique de l'eau de mer ont un effet délétère sur les écosystèmes océaniques qui étaient déjà stressés par la surpêche et la pollution.

Ainsi, si le changement climatique joue bien un rôle direct sur les pertes de diversité biologique, variables selon les lieux géographiques, celles-ci contribuent aussi en retour au dérèglement lui-même ! La surpêche des poissons pélagiques peut ainsi affecter la capacité de l'océan à fixer le CO₂ ! Et n'oublions pas qu'aux effets de ce climat trop rapidement changeant s'ajoutent ceux liés à la destruction et à la pollution des littoraux, aux surexploitations systématiques accélérées des ressources vivantes et à la dissémination anarchique d'espèces (dont les ballastages de grands navires). Cela fait beaucoup et il est grand temps de réagir !

PLANCTON, CHAMPION DE LA BIODIVERSITÉ

Christian Sardet

Essentiel à l'équilibre de l'océan et de l'atmosphère de la planète, le plancton est l'ensemble des organismes qui dérivent avec les courants - des bactéries et virus jusqu'aux larves de poissons et aux méduses.



Mélange de plancton de 5 à 7 mm collecté en baie de Shimodo (Japon)



Le plancton est le champion de la biodiversité sur la planète. A part les plantes terrestres, toutes les branches de l'arbre du vivant sont représentées dans le plancton car outre les êtres qui dérivent toute leur vie, la plupart des espèces animales peuplant les fonds marins et les côtes sont planctoniques aux stades embryonnaires et larvaires. La grande diversité biologique réside chez les protistes, ces êtres unicellulaires qui possèdent un noyau et des organelles et qui comme nous sont des eucaryotes. Les premiers résultats de l'expédition *Tara oceans* basés sur l'analyse des gènes ont mis en évidence l'extrême biodiversité des eucaryotes planctoniques et l'étendue de notre ignorance.

Le plancton nourrit crustacés, mollusques, poissons, et les milliards d'oiseaux, de mammifères et d'hommes qui les consomment. Le plancton végétal - le phytoplancton - génère la moitié de l'oxygène sur terre et fixe autant de CO₂ que toutes les plantes et forêts. L'ensemble des organismes planctoniques représente près de 98% de la biomasse des océans et l'enfouissement dans les abysses des cadavres et déjections pendant plus d'un milliard d'années a généré pétrole et gaz.

Les écosystèmes planctoniques sont soumis à d'énormes contraintes : les surpêches et de multiples formes de pollution affectent les équilibres et l'adaptation des organismes. Principale cause de l'acidification des océans, l'augmentation du CO₂ rejeté dans l'atmosphère, crée un milieu au sein duquel les innombrables organismes et larves à coquilles calcaires ne peuvent plus fabriquer leurs demeures et protections. Ce sont ces coques et squelettes qui, en tombant au fond des océans pendant des centaines de millions d'années ont produit les sédiments siliceux et calciques qui sont dans les falaises, les montagnes et les pierres de nos maisons et monuments.

Dans un nombre croissant d'environnements fragilisés, méduses et autres animaux gélatineux prennent progressivement la place des grands prédateurs poissons et mammifères dont les stocks s'amenuisent. Cela pose d'énormes problèmes quand à l'avenir des pêcheries qui nourrissent un nombre considérable d'humains. On collecte et on cultive du plancton pour nourrir poissons et crevettes dans des fermes aquacoles sur les côtes ou en haute mer et certaines populations asiatiques se délectent de méduses. Les tendances sont là, mais il est trop tôt pour savoir de quoi l'avenir sera fait.

L'océan et les provinces maritimes sont vastes, diversifiés et en constante évolution, face aux changements des conditions naturelles et des activités humaines. La nature et l'abondance du plancton changent avec le temps et le lieu. A la dérive dans les eaux de surface et profondes, répondant aux marées, aux cycles jour-nuit, aux saisons et événements inter-annuels comme El Niño, le plancton est un écosystème complexe composé d'une multitude d'organismes en interactions les uns avec les autres caractérisés par des cycles de vie et de reproduction incroyablement variés et dynamiques. Chaque individu uni ou multi-cellulaire est un complet écosystème dérivant avec sa cohorte de virus, de bactéries, de parasites, et de symbiotes.

Que faire devant cette complexité et l'étendue de notre ignorance ? Collecter, décrire, analyser la diversité planctonique et ses évolutions, puis essayer de faire des prévisions intelligentes pour l'avenir. Informer les populations et décideurs des conséquences des évolutions en cours et à venir. Cette biodiversité extraordinaire, ces ressources planctoniques génétiques et pharmacologiques immenses vont-elles disparaître ? Les récifs vont-ils perdre leurs symbiotes planctonique et blanchir, ces mangroves périlcliter sans la cohorte des organismes qui les façonnent ? Quelles seront les conséquences des changements de l'écosystème planctonique pour la pêche, le tourisme, la protection du littoral ? En face de l'explosion de l'exploitation des ressources portée par les développements technologiques, d'un trafic maritime gigantesque disséminateur d'espèces invasives, de l'extraordinaire croissance de la population mondiale et de ses consommations et pollutions nous devons anticiper ce que deviendra la vie dans les océans. Cette bataille de la connaissance et la nécessité de faire des prédictions pour agir durablement sont un défi puissant et potentiellement fédérateur pour les générations actuelles et futures.

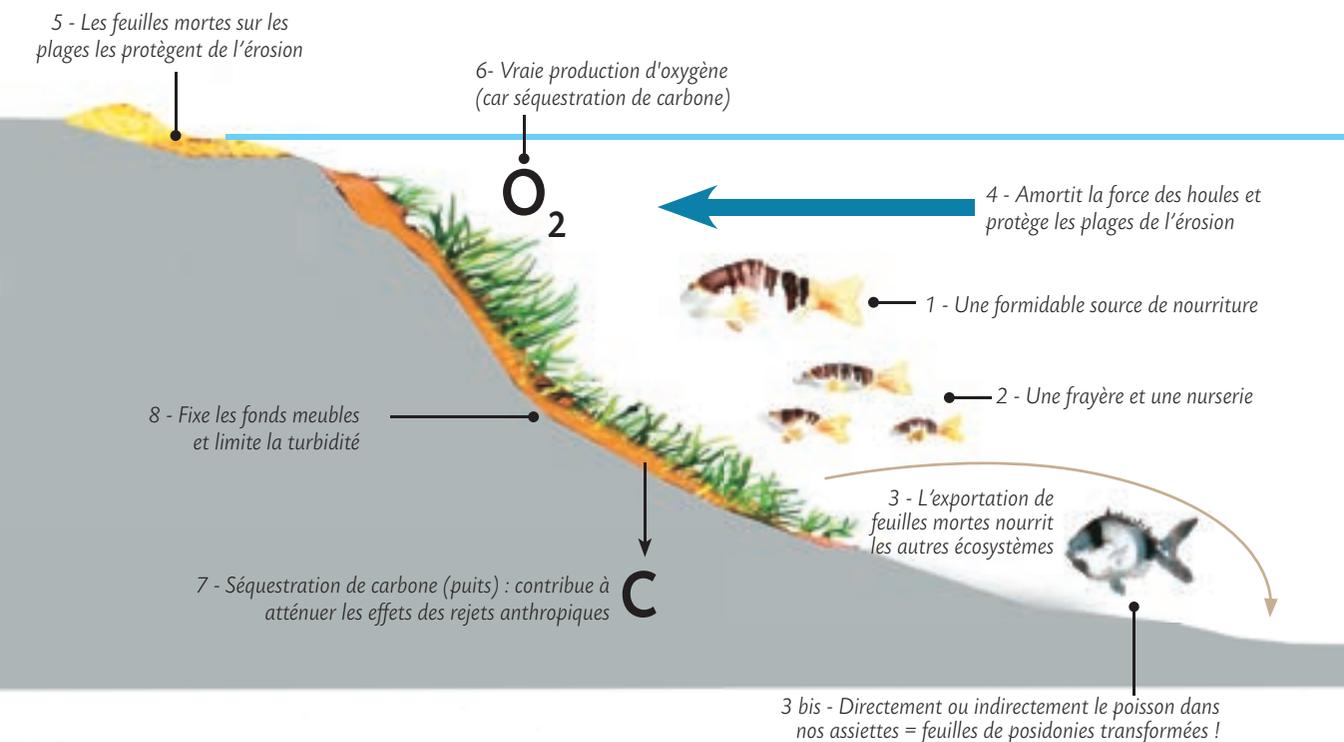
SERVICES RENDUS PAR LES HERBIERS DE POSIDONIES

Charles François Boudouresque

L'herbier de posidonie (*Posidonia oceanica*) est l'écosystème le plus emblématique de Méditerranée et l'un des plus importants pour son fonctionnement. Il se développe de la surface à 40 m de profondeur, mais son influence se fait sentir sur toute la colonne d'eau et jusqu'aux plus grandes profondeurs.

Les services écosystémiques correspondent aux biens qu'un écosystème fournit et aux services qu'il rend à l'homme (bien involontairement, bien sûr), biens et services qui peuvent être chiffrés en termes de valeur monétaire. Huit biens et services écosystémiques, issus de l'herbier de posidonie, ont été identifiés. Le changement global est susceptible de les remettre en cause. La régression de l'herbier, due aux chalutages, aux aménagements littoraux et à la pollution, les menace tous. L'enlèvement des feuilles mortes sur les plages menace plus spécifiquement les plages (service 5), qui sont alors érodées, et l'exportation de feuilles vers les autres écosystèmes (service 3). Les invasions biologiques réduisent le rôle de l'herbier pour la pêche (services 1 et 2). La montée du niveau de la mer provoque la régression de l'herbier profond.

Contrairement aux autres facettes du changement global, l'impact du réchauffement de l'eau sur l'herbier de posidonie est moins bien établi, tout en moins en Méditerranée occidentale, où le facteur limitant est plus le froid que les températures élevées.



Atténuation des événements extrêmes

Plusieurs espèces de magnoliophytes marines, de même que les mangroves ou les récifs, sont également à même d'atténuer l'énergie des vagues et des courants. Différents herbiers peu profonds (*Zostera marina*, *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme*, *Thalassia testudinum*), peuvent réduire, de manière parfois significative, l'énergie des vagues. L'amortissement de la houle est d'autant plus efficace que la hauteur de l'herbier est importante par rapport à la hauteur de la tranche d'eau ; elle peut donc varier selon les saisons. L'atténuation des vagues et la protection du littoral ne s'exercent que jusqu'à un certain seuil, une certaine limite, au-delà de laquelle l'herbier lui-même est endommagé voire détruit.

Une caractéristique commune aux côtes sableuses de Méditerranée est l'accumulation de débris de *Posidonia oceanica* (banquettes). Ces banquettes, dont 95 % sont constitués par les feuilles mortes, peuvent atteindre plus de 2 m de hauteur et jusqu'à 20 m de largeur. Lorsque les conditions le permettent, le matériel accumulé peut se consolider et donner naissance à une structure très compacte et résistante qui peut rester en place pendant plusieurs années offrant une protection très efficace contre l'érosion du littoral. En outre, les feuilles mortes de *Posidonia oceanica* contribuent à la formation des dunes d'arrière-plage, directement, en stabilisant le sédiment et en permettant l'installation de magnoliophytes halophiles et psammophiles, et indirectement en constituant une source d'azote significative pour ces dernières ; or, ces dunes jouent un rôle essentiel dans la résistance des plages aux tempêtes.

Après le passage de ces événements, les herbiers pourront réduire le potentiel de remise en suspension du sédiment, augmenter la vitesse de sédimentation et, par là même, réduire plus rapidement la turbidité.

Toutefois, comme pour les mangroves ou les marais maritimes, si les herbiers sont à même de jouer un rôle « d'amortisseur » dans des conditions normales, en revanche lors d'événements plus intenses (vagues de tsunamis ou de tempêtes extrêmes) leur action risque d'être plus limitée. La capacité d'atténuation dépendra également de leur résistance (différente d'une espèce à l'autre), et en fonction de leurs caractéristiques (longueur des feuilles, densité), des caractéristiques de l'aléa (intensité, orientation, durée), de la bathymétrie, des volumes sédimentaires présents et de leur mobilité, d'où une grande variabilité locale de réponses. (UICN, 2012).

LA MANGROVE, LIGNE DE DÉFENSE NATURELLE DES LITTORAUX TROPICAUX

Cyril Marchand

La mangrove est présente dans 120 pays sur près de 75% des littoraux tropicaux et subtropicaux, couvrant environ 150 000 km². La biodiversité et la productivité de ces forêts de palétuviers sont fonction du type de climat dans lequel elles se développent, et varient donc suivant la latitude et avec les changements climatiques.

Dans tous ces pays, la mangrove joue un rôle essentiel, aussi bien physique qu'écologique, dans la conservation des littoraux. La canopée atténue la puissance du vent et la mangrove stabilise le trait de côte ; défense naturelle contre les événements météorologiques extrêmes grâce à son dense réseau de racines aériennes, elle sert de barrière naturelle contre l'érosion due à la houle, en diminuant l'énergie des vagues et en modifiant les hydrocirculations. On estime qu'une largeur de mangrove de 100 mètres serait suffisante pour réduire l'énergie des vagues de 90%. Cette efficacité a été prouvée à grande échelle lors du tsunami de 2004 en Asie du Sud-Est, où les dommages ont été plus faibles le long des littoraux colonisés par la mangrove.



Du fait de leur forte productivité, les forêts de palétuviers sont à la base du cycle des nutriments en milieu côtier. Les eaux littorales bordant les mangroves sont généralement riches en crevettes et poissons, d'une importance capitale pour l'industrie de la pêche. Refuge pour de nombreuses espèces, la mangrove abrite une grande diversité faunistique : des espèces menacées d'extinction, tel l'Ibis rouge, s'y cachent ; des prédateurs viennent s'y nourrir, comme le jaguar. Certains poissons viennent s'y reproduire, d'autres y assurent leur croissance : elle sert de protection aux juvéniles avant leur migration dans les eaux côtières. Les crabes y sont nombreux aussi, certaines espèces se nourrissent de débris végétaux, d'autres de petites proies vivantes. Malgré son inhospitalité et son insalubrité, les ressources fournies par la mangrove sont précieuses ; elle assure les besoins élémentaires et vitaux pour des millions de personnes et maintient les cultures traditionnelles.

Chaque strate de mangrove, caractérisée par une espèce de palétuviers, rend des services écosystémiques spécifiques, grâce aux strates adjacentes qui ont-elles-mêmes leur spécificité. Par exemple, dans le cadre de l'utilisation de la mangrove pour la filtration d'eaux usées, les différentes strates de mangroves vont agir comme une cascade de filtres, et l'action de la dernière sera conditionnée par celle de la première. Par ailleurs, plus la biodiversité végétale de la mangrove sera importante et plus il lui sera facile de se remettre d'une perturbation, qu'elle soit naturelle ou anthropique. Malheureusement, dans de nombreux pays où les mangroves ont été restaurées après dégradation, une seule espèce a été replantée, limitant alors le nombre de fonctions assurées par la mangrove, ainsi que sa résilience, la rendant plus fragile vis-à-vis des futures pressions.

GRANDES FORÊTS D'ALGUES BRUNES : ÉCOSYSTÈMES PROTECTEURS ET NOURRICIERS DES ZONES TEMPÉRÉES

Philippe Potin, Myriam Valero

Parmi les grandes algues brunes, les espèces de l'ordre des Laminariales forment des forêts sous-marines qui dominent les milieux côtiers rocheux des zones froides à tempérées à travers le monde et jouent un rôle écologique majeur (Steneck et al. 2002).

Producteurs primaires, elles constituent les plus grandes structures biogéniques des écosystèmes marins benthiques et forment ainsi un habitat en trois dimensions, fournissant substrat, protection et nourriture en quantité d'autres organismes marins tels que d'autres algues, des mollusques, des crustacés et quantité d'autres invertébrés fixés ou mobiles, ainsi que des poissons et des mammifères (Smale et al. 2013).



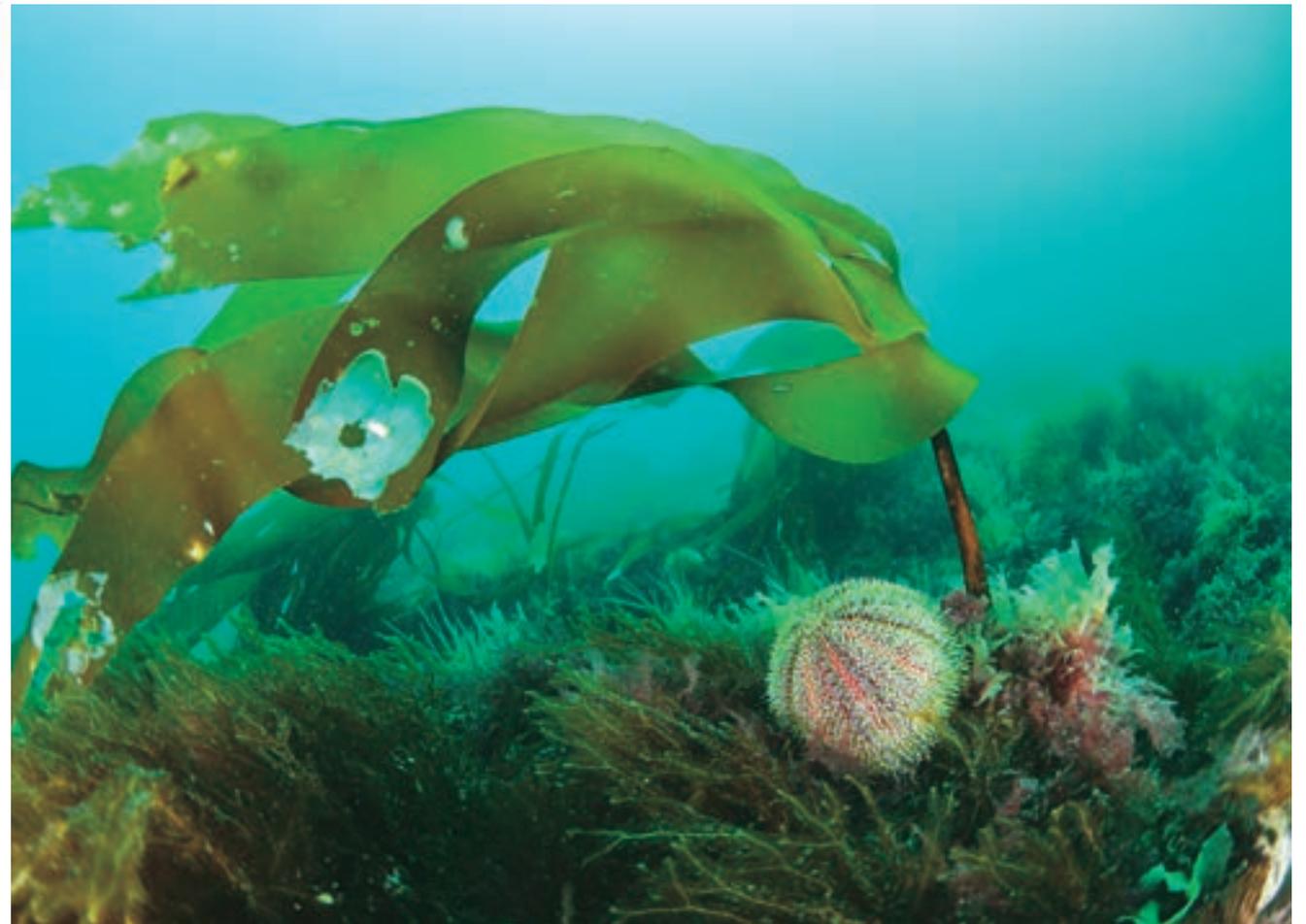
Dans les réseaux trophiques des forêts de *Laminaria hyperborea* de l'Atlantique du Nord-Est, une proportion limitée de la production primaire est consommée directement par les herbivores et près de 80% de cette production alimente les niveaux trophiques des détritivores et de la boucle microbienne avec de fortes variations saisonnières. La majeure partie de la production est donc exportée par de forts courants de marée et contribue à la productivité des fonds sableux adjacents. Les pêcheries qui bénéficient de l'apport de ces forêts sont donc très diverses, incluant la pêche des algues elles-mêmes, les crustacés, poissons, oursins et mollusques inféodés à cet habitat et les pêcheries de poissons ou de coquillages sur les fonds sableux. Par ailleurs, ces forêts de grandes algues brunes atténuent considérablement l'énergie hydraulique, sur des dizaines de mètres de profondeur pour les forêts d'algues géantes de *Macrocystis pyrifera*. Parfois jusqu'au point de rupture, comme c'est le cas en zone intertidale, dans des secteurs de très forts courants de marée ou trop exposés aux vagues, qui abritent des espèces strictement adaptées, comme certaines espèces de *Fucus* spp. dans l'Atlantique Nord ou différentes Fucales (*Durvillea antarctica*) et Laminariales (*Lessonia* spp.) sur les côtes des océans Austral et du Pacifique. Ainsi, une étude multidisciplinaire regroupant biologistes et archéologues a démontré que les forêts de ces grandes algues brunes de par leur rôle protecteur et nourricier avaient représenté un véritable autoroute facilitant la migration des populations humaines le long du Pacifique lors de la colonisation de l'Amérique il y a plus de 10 000 ans (Erlanson et al., 2007).

Cependant l'ensemble des pressions anthropiques directes (e.g. l'exploitation) et indirectes (e.g. la pollution et le réchauffement climatique) que subissent les forêts de laminaires les rend vulnérables, au même titre que d'autres écosystèmes marins dominés par les coraux ou les poissons. Ainsi, on observe des phénomènes de disparition cycliques de ces forêts suite à l'effet de cascades trophiques dues à la pullulation d'herbivores (oursins) qui broutent les laminaires. Cette pullulation est la conséquence du déclin de certaines espèces des plus hauts niveaux trophiques comme la loutre de mer dans le Pacifique Nord ; déclin, expliqué par leur chasse excessive par l'Homme, puis à des changements de comportement de prédation des orques, ou encore la surpêche des langoustes (*Jasus edwardsii*) en Tasmanie. Ces exemples ont montré que l'état initial pouvait être retrouvé lorsqu'on arrête la pression sur les espèces des plus hauts niveaux de la chaîne trophique. De plus, à travers le globe, l'urbanisation du littoral est à l'origine de la disparition massive de forêts de laminaires le long des côtes tandis que la distribution et l'abondance de plusieurs espèces de laminaires ont changé, en réponse au réchauffement des eaux (e.g. *Laminaria ochroleuca* s'est étendue vers le Nord le long des côtes britannique mais décroît en abondance au niveau de la péninsule ibérique; *Saccorhiza polyschides* disparaît du sud de la péninsule ibérique) et continueront vraisemblablement à le faire (Raybaud et al. 2013).

Quel devenir pour les écosystèmes des forêts de laminaires ?

Dans le contexte du changement global, l'ensemble des services rendus par les écosystèmes des forêts de laminaires, y compris leur contribution aux grands cycles biogéochimiques, comme celui du carbone ou celui de l'iode est modifié. Au-delà des effets directs sur les pêcheries, les activités récréationnelles, de tourisme et la valeur patrimoniale de ces habitats se réduiront et d'autres services sur la mitigation de l'eutrophisation ou la protection des côtes de l'érosion par la dissipation de l'énergie de la houle, des vagues et des courants (Arkema et al., 2013) seront également perdus. Mais même ces peuplements adaptés à des conditions d'hydrodynamisme extrême subissent des mortalités importantes, pouvant dépasser la moitié de la biomasse en place, lors d'évènements majeurs comme des conjonctions de houles exceptionnelles et de grandes amplitudes de marées, ainsi que cela est rapporté de plus en plus fréquemment. Ces algues dérivent alors et viennent s'échouer sur les plages. Ces échouages massifs par les tempêtes ont également des fonctions multiples notamment en matière de stabilité des hauts de plages et des milieux dunaires (Smale et al., 2013).

Face à l'accélération de certaines disparitions d'habitats, parfois renforcées par d'autres facteurs comme la pêche ou l'eutrophisation, les aires marines protégées suffiront-elles ? L'aquaculture et/ou la restauration écologique permettront-elles de compenser des pertes de peuplements et de maintenir ainsi certaines fonctions des forêts d'algues, rétablissant des rôles d'abris, de supports, de nourrissage et d'exportation de la matière organique qui compenseraient les pertes des espèces architectes pérennes ? Au-delà de la capture du CO₂ par les grandes algues, il est urgent de mettre en place une politique de gestion afin de préserver les stocks génétiques menacés ce qui implique une bonne connaissance de la diversité des populations naturelles. On pourrait alors envisager de tester la faisabilité d'un ensemencement pour la réintroduction dans les sites où les laminaires sont en régression dramatique, en suivant des méthodes de sea-ranching, comme pour le saumon Pacifique, ou celles pratiquées pour la gestion de peuplements de certains bivalves comme les pectinidés. En restaurant des habitats, les écosystèmes pourraient montrer une bien plus grande résilience et leurs services écosystémiques pourraient être maintenus.

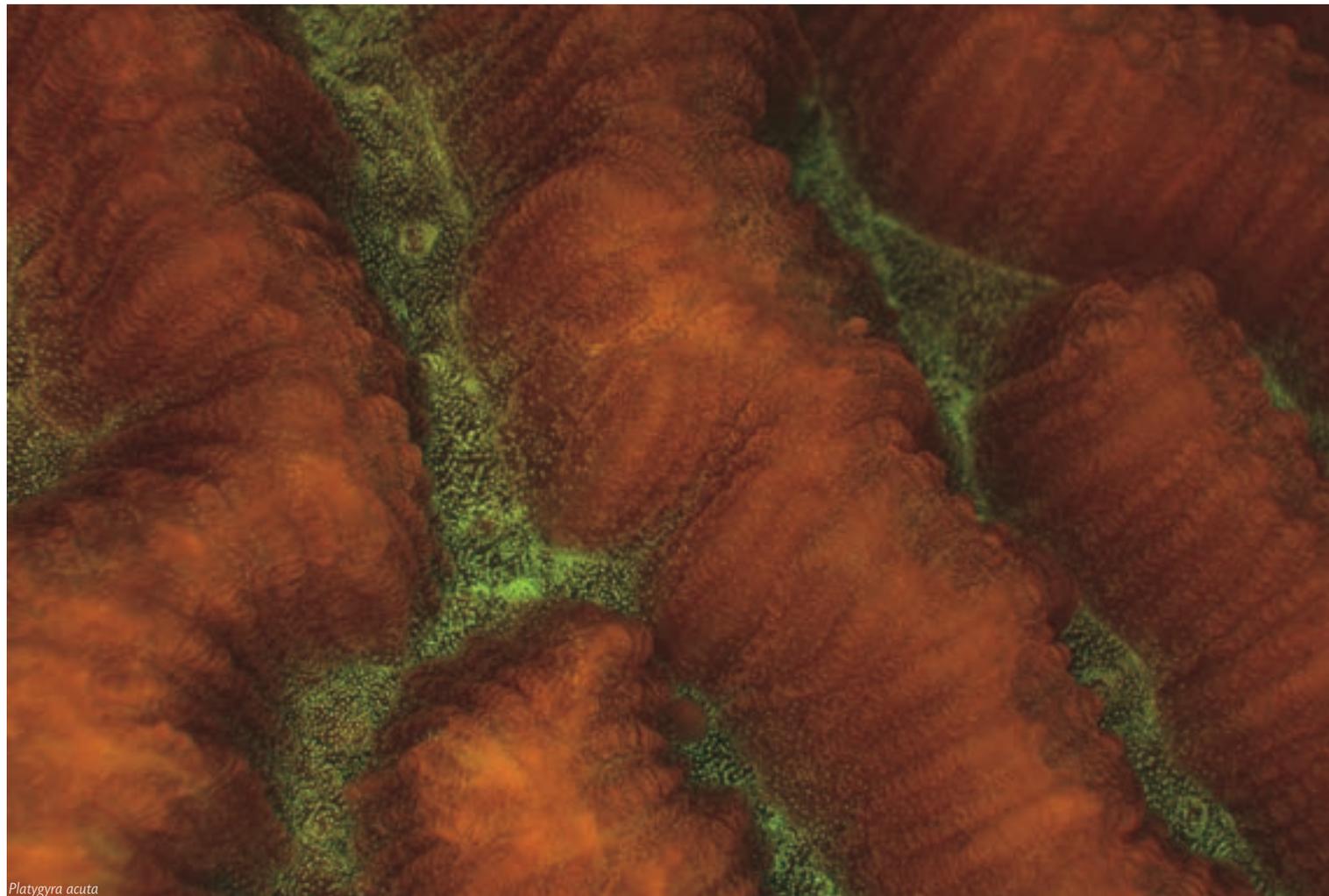


Laminaria digitata (Bretagne, France)

RÉCIFS CORALLIENS, REMPARTS NOURRICIERS

Serge Planes et Denis Allemand

Concentrés de biodiversité, les récifs coralliens abritent le tiers de la faune et de la flore marine sur seulement 0,2 % des surfaces marines mondiales. En gros, 1 km² de récifs coralliens contient autant d'espèces que l'ensemble du littoral métropolitain français.



Formés par l'amoncellement des squelettes de coraux solidifiés par l'activité biologique d'organismes tels que les algues calcaires, ils constituent de véritables barrières qui protègent les côtes et leurs habitants des tempêtes, cyclones et tsunamis. Une étude récente montre qu'un récif brise 97 % de l'énergie des vagues et diminue la hauteur des vagues de 85 % (Ferrario et al, 2014). Ils sont sources de revenus indispensables pour de nombreuses économies de pays en développement : on estime qu'1 km² de récif peut produire de 10 à 15 tonnes de poissons par an et l'on considère que les récifs représentent le quart du potentiel halieutique de l'ensemble des pays en développement ; 30 millions de personnes dans le monde dépendraient entièrement des récifs pour leur nourriture. Ils attirent chaque année des milliers de visiteurs, pourvoyeurs de devises, et fournissent des substances actives utiles dans le domaine des biotechnologies marines (composés antifouling, produits cosmétiques ou d'intérêt thérapeutique). Mais ils font face à des régressions dramatiques : on évalue à près de 25 % les récifs coralliens déjà disparus au cours des 20 dernières années et à près de 50 % ceux qui sont en situation critique à ce jour.

Le corail est à l'image de la complexité de l'écosystème corallien : il se développe grâce à une endosymbiose avec des algues unicellulaires photosynthétiques, les zooxanthelles, localisées à l'intérieur des tissus coralliens. Les deux partenaires ont co-évolué depuis le Trias (Muscatine et al., 2005, in Allemand, 2015), adoptant des capacités uniques : capacité de l'hôte animal à absorber activement le CO₂, des composés azotés minéraux à se protéger des rayons ultra-violet, de l'hyperoxie et du stress oxydant ; capacité du symbiote algal à échanger des nutriments avec son hôte, etc. (Furla et al. 2005, 2011 in Allemand, 2015). Cette symbiose concentre les travaux de recherche depuis plus de 20 ans, notamment pour mieux appréhender la contribution énergétique de la zooxanthelle dans la symbiose. Ces travaux ont montré l'existence de nombreux clades de zooxanthelles, aux performances éco-physiologiques variées et dont la diversité pourrait être un moteur dans la capacité d'adaptation du corail aux changements environnementaux. Les questionnements actuels portent sur la variabilité de l'expression génique face aux différents types de stress, stress globaux tels que l'augmentation de la température des océans ou l'acidification, ou stress plus locaux comme la sédimentation excessive due à la déforestation des bassins versants.

Le blanchissement des coraux en situation de stress est issu de la rupture de la symbiose avec le corail qui expulse ou digère alors les zooxanthelles. Les mécanismes cellulaires et moléculaires entraînant cette rupture font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches.

La biodiversité des récifs, presque infinie si l'on considère le monde microbien, est encore largement inconnue. Cette diversité et les relations complexes qu'ont construites les espèces récifales entre elles (symbiose, commensalisme, ...) sont essentielles. Des études récentes ont montré que la variable qui influence le plus la survie du récif après un stress, est la complexité structurelle du système corallien : plus un habitat corallien est complexe et diversifié avant sa dégradation, plus sa probabilité de résilience est forte (Nicholas et al., 2015).

C'est dans ce contexte environnemental que la recherche doit se développer pour mieux intégrer la complexité des écosystèmes coralliens, pour mieux appréhender les processus de persistance des populations et des peuplements et pour mieux comprendre les mécanismes de résistance aux stress, tout ceci dans le contexte d'un écosystème en contact étroit avec les populations humaines littorales.

RÉCIFS CORALLIENS ET CO₂

Denis Allemand

La croissance récifale est de l'ordre de 4 kg de carbonate de calcium (CaCO₃) par m² et par an (Smith & Kinsey 1976), mais les valeurs varient beaucoup d'un récif à un autre et peuvent atteindre dans certains cas 35 kg CaCO₃/m² par an (Barnes & Chalker 1990) soit des taux de croissance verticale annuel pouvant atteindre la dizaine de cm par an (Buddemeier & Kinzie 1976). De nombreux facteurs influencent ces taux de croissance : lumière, température (optimale entre 22° et 29°C), nutriments, courants, turbidité, pH et état de saturation en carbonate de calcium de l'eau de mer...

La formation de carbonate de calcium par les organismes constructeurs de récifs entraînent la libération dans le milieu de gaz carbonique : ainsi, contrairement à ce qui a été longtemps imaginé, un récif principalement dominé par des coraux se comporte comme une source – mineure - de CO₂ et non un puits. Les récifs jouent par contre un rôle important en stockant le carbone inorganique provenant des continents sous forme de CaCO₃, de l'ordre de 70 à 90 millions de tonnes de carbone par an.

LA DIVERSITÉ DES POISSONS DE RÉCIFS

Michel Kulbicki



Explosion de vie en Mer Rouge

Il existe environ 32 000 espèces de poissons dans le monde dont plus de 17 000 marins. Parmi ces derniers, plus du tiers (6 300 espèces) est inféodé aux récifs coralliens, qui représentent pourtant moins de 0.2% des surfaces mondiales. Ces poissons constituent les communautés de vertébrés les plus diversifiées de la planète avec par endroits plusieurs centaines d'espèces par hectare. Pour donner un ordre d'idée, les côtes européennes du nord de la Norvège jusqu'à Chypre abritent moins de 600 espèces côtières pour plus de 20 000 km de linéaire côtier, alors que la seule Nouvelle Calédonie avec 1 500 km de linéaire, abrite plus de 1800 espèces inféodées aux récifs.

Au-delà du plaisir des yeux, cette diversité contribue à de nombreux services. En premier lieu, au bon fonctionnement de ces systèmes coralliens car de nombreuses espèces de poissons contrôlent les relations, fragilisées par les changements globaux, entre coraux et algues. Des ruptures dans ces relations pourraient entraîner une diminution du rôle de ces récifs comme fournisseur de protéine, comme protecteur du linéaire côtier ou comme source de biodiversité.

Nous savons par ailleurs que plus le nombre d'espèces est important et plus ces communautés de poissons seront productives ; une région riche en espèces offrira donc plus de ressources aux populations locales qu'une région pauvre en espèces.

Mais la richesse en espèces connaît d'importantes différences naturelles d'une région à une autre : la zone délimitée par la mer de Chine, les Philippines et l'Indonésie, surnommée le Triangle de Corail, abrite le maximum de diversité en poissons coralliens, environ 60% des espèces connues. A mesure que l'on s'éloigne de cette région, la diversité des poissons coralliens chute. Dans l'Atlantique le maximum se situe dans les Caraïbes, qui abritent environ 900 espèces, mais la diversité chute très rapidement dès que l'on s'en éloigne. Une des particularités des poissons coralliens est d'avoir de très vastes répartitions géographiques pour la plupart des espèces. Ainsi La Réunion et Tahiti, pourtant distantes de plus de 15 000 km, partagent près de 50% de leurs espèces. En revanche il y a très peu d'espèces communes entre l'Indo-Pacifique et l'Atlantique ou même l'est du Pacifique (de la Californie au Pérou).

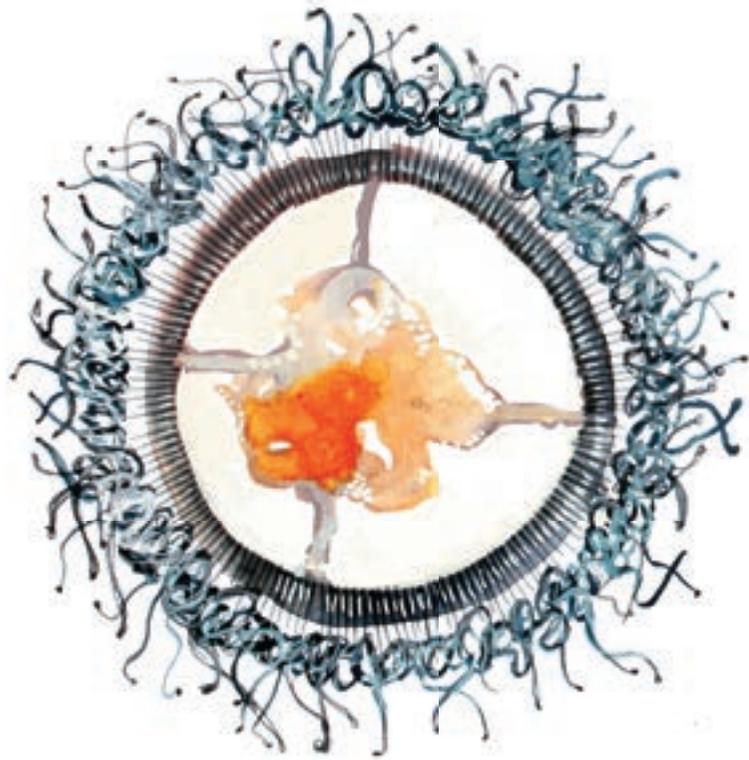
Les espèces de poissons coralliens disparaissent rarement de façon définitive, en revanche bon nombre de ces espèces ont disparu de régions où elles étaient présentes (extirpation) et d'autres ont atteint des niveaux d'abondance si bas qu'elles n'assurent plus leur rôle écologique habituel (inactivation écologique). Cet affaiblissement de la diversité n'a pas la même importance pour toutes les espèces. Chaque espèce assure une ou plusieurs fonctions écologiques. Certaines de ces fonctions sont assurées par plusieurs espèces. Dans ce cas l'affaiblissement d'une des espèces peut être pour tout ou partie compensé par une ou plusieurs des espèces restantes pour cette fonction.

En revanche nombre de fonctions écologiques ne sont assurées que par une seule espèce. L'affaiblissement de cette espèce entraîne la disparition ou l'insuffisance de la fonction pour assurer un bon fonctionnement du système.

Malheureusement, pour les poissons coralliens, comme pour l'essentiel de la biodiversité, ces fonctions uniques sont essentiellement assurées par des espèces rares et donc fragiles. Il en résulte que la disparition ou l'affaiblissement d'un nombre restreint d'espèces peut avoir des conséquences graves sur la pérennité des systèmes tels que nous les connaissons. Cependant il convient de noter que plus un système comporte d'espèces et moins la perte de fonctions aura de conséquences par le biais d'effets compensatoires assurés par des espèces aux fonctions voisines. Il est donc essentiel de tenter de préserver au maximum l'ensemble de la diversité pour assurer la pérennité des systèmes.



Oeufs de Leptogaster agglutinés ensemble sous une pierre (Marseille, France)



CHAPITRE 3

CHANGEMENTS
GLOBAUX ET
DÉSÉQUILIBRES
INDUITS

L'OCÉAN, ACTEUR ET VICTIME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Jean Pierre Gattuso et Alexandre Magnan

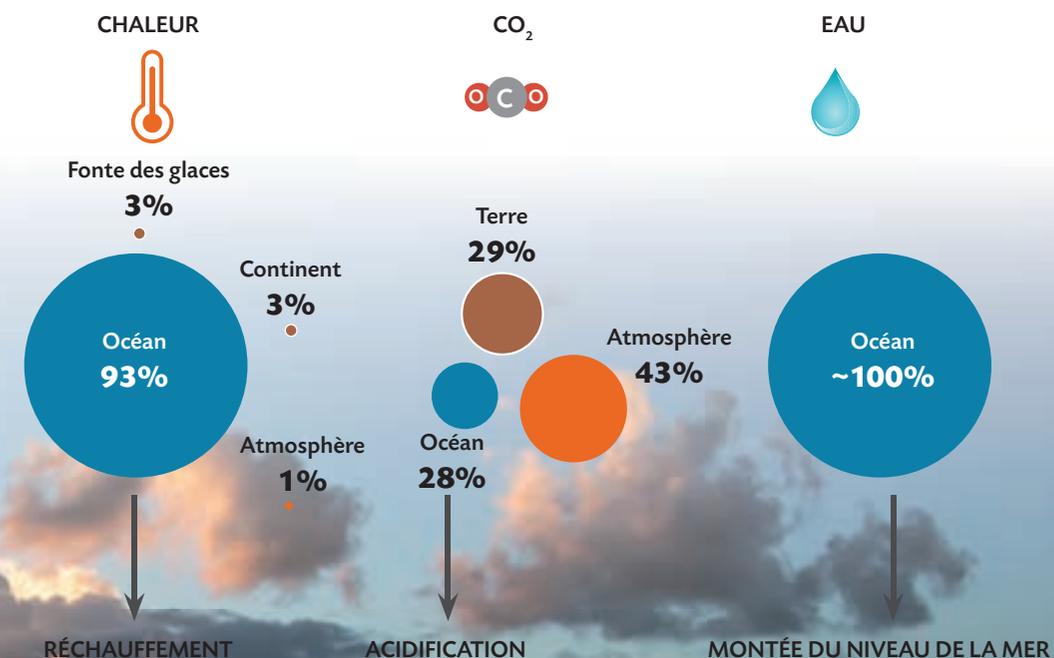
« Acteur », parce qu'il a largement contribué à atténuer l'ampleur du changement climatique contemporain, en absorbant 93 % de la chaleur accumulée dans l'atmosphère du fait de l'augmentation de l'effet de serre ; en captant plus du quart des émissions de CO₂ d'origine anthropique depuis 1750 ; et en recevant la quasi-totalité de l'eau produite par la fonte des glaces. Ces processus qui permettent la régulation du changement climatique s'accompagnent cependant de lourdes conséquences sur les paramètres physiques et chimiques de l'océan, puis sur les organismes et écosystèmes marins et côtiers, et enfin sur les sociétés humaines. Cela explique pourquoi l'océan est également « victime » du changement climatique, plus précisément des émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines.

On compte au moins trois grandes modifications majeures de l'océan.

- D'abord, l'augmentation de la teneur en CO₂ dissous dans l'eau de mer, qui entraîne une diminution du pH (correspondant à une augmentation d'acidité) et une réduction des ions carbonate (CO₃²⁻). Ce phénomène est connu sous le nom d'acidification de l'océan. Les projections pour le XXI^{ème} siècle annoncent des réductions du pH global de l'eau de surface de 8,1 avant l'ère industrielle à environ 7,7 en 2100. Si une chute de 0,4 unités peut sembler négligeable, elle correspond en fait à un triplement de l'acidité. Cela pourrait engendrer de grands bouleversements, en particulier sur la capacité des organismes vivants, plantes et animaux, à fabriquer leurs squelettes et coquilles.
- L'augmentation de la température des eaux océaniques de surface, ensuite, s'explique par le stockage par l'océan d'une très large majorité de l'énergie accumulée par le système climatique. Les premiers 75 m d'eau se sont globalement réchauffés de 0,11°C par décennie entre 1971 et 2010, tendance perceptible jusqu'à une profondeur de 700 m. Les conséquences seront majeures : migration d'espèces, perturbation des échanges d'oxygène, impact irréversible sur les récifs coralliens (blanchissement), etc.
- Enfin, l'élévation du niveau de la mer résulte de la combinaison du réchauffement qui augmente le volume de l'océan et de l'apport d'eau lié à la fonte des glaces. Elle s'est faite au rythme de 1,7 mm/an en moyenne à l'échelle du globe sur l'ensemble du XX^{ème} siècle, et les projections les plus pessimistes du GIEC estiment qu'elle atteindra entre 52 à 98 cm d'ici à 2100, fourchette de valeurs que certains spécialistes jugent par ailleurs sous-estimée. Ses effets, comme la submersion plus ou moins temporaire des plaines côtières et la salinisation des sols en zone littorale, sont bien connus.

Ces trois processus vont, aux côtés d'autres, globaux (désoxygénation des eaux océaniques) ou locaux (pollution et aménagements côtiers), affecter les organismes et écosystèmes marins et côtiers au travers d'une fragilisation des populations de plancton, de micro-organismes calcaires, etc., puis par effet induit, des habitats et espèces benthiques (qui s'appuient sur un substrat) et pélagiques (en pleine mer). On s'attend ainsi à une perturbation importante de l'abondance des communautés biologiques, de la phénologie des espèces et de leur répartition géographique au cours des siècles à venir. Cela va affecter les interactions entre espèces : compétition, rapports proies-prédateurs, espèces invasives, extinctions, etc.

Enfin, au bout du processus d'impacts, se trouvent les activités humaines qui recourent schématiquement cinq domaines. La difficulté des organismes à construire leurs squelettes et coquilles a déjà commencé à avoir un impact sur l'aquaculture, qui sera par ailleurs affectée par les dégâts sur les infrastructures liés à certains événements extrêmes (tempêtes) et à l'élévation du niveau de la mer. Ces derniers phénomènes provoqueront également des dégâts sur les infrastructures de pêche, alors que l'activité aura déjà à faire face à une diminution des stocks de poissons et/ou à leur redistribution géographique. Cela affectera sans aucun doute les marchés mondiaux et, compte tenu de l'importance des protéines animales d'origine marine dans l'alimentation mondiale, posera la question de la sécurité alimentaire. La sécurité sanitaire de certaines régions sera également interrogée car des bactéries comme celle du choléra pourraient faire l'objet d'une abondance plus grande en raison du réchauffement. L'élévation du niveau de la mer et les événements extrêmes auront également des conséquences sur les risques côtiers (augmentation de l'ampleur des impacts des aléas, destruction des infrastructures côtières, exposition des populations littorales). Enfin, les impacts écologiques pourraient lourdement contraindre le tourisme côtier dans de nombreuses destinations à l'échelle de la planète.



CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIODIVERSITÉ DU PLANCTON

Grégory Beaugrand

Le plancton a été beaucoup étudié dans le contexte des changements climatiques car sa distribution spatiale n'est pas influencée en général par les effets plus directs des activités humaines tels que la dégradation de l'habitation, la pollution et la surexploitation. D'autre part, ces organismes ectothermes² sont très sensibles à de faibles fluctuations de températures. Enfin, ces organismes ont un rôle clé dans le fonctionnement des écosystèmes et sont à la base du réseau trophique et des services écosystémiques de régulation (cycle du carbone) et d'approvisionnement (pêche et aquaculture).

La biodiversité planctonique marine, souvent appréciée au niveau organisationnel spécifique, est estimée à 11 200 espèces, dont 4 350 phytoplanctoniques, 1 650 proto-zooplanctoniques (protozoaires) et 5 500 méta-zooplanctoniques (métazoaires). Deux problèmes principaux limitent encore l'étude des effets du changement climatique global sur la biodiversité : le nombre total d'espèces planctoniques restant à découvrir, à inventorier et à décrire est important ; nous connaissons encore peu de choses sur la biologie et l'écologie du plancton. Malgré notre connaissance fragmentaire de leur biologie et de leur écologie, la théorisation et la modélisation suggèrent que le changement climatique pourrait altérer la biodiversité planctonique de l'ensemble de la biosphère océanique.

Les travaux sur le sujet indiquent en particulier que les conséquences du changement climatique anthropique sur la biodiversité du plancton ne seront pas uniformes dans l'espace ; la biodiversité des eaux chaudes tropicales aura tendance à diminuer alors que celle des eaux tempérées et des eaux polaires devrait augmenter. Bien que le nombre total d'espèces ne semble pas être affectée à la fin du siècle, la réorganisation globale de la biodiversité et les changements biologiques et écologiques dans les eaux de surface pourraient être très importants. Si le réchauffement est maîtrisé, c'est-à-dire s'il reste bien inférieur à 2°C, les changements biologiques dans l'océan auront des conséquences limitées, bien que 40% de la superficie des océans connaîtra un changement important de sa biodiversité. Pour comparaison, la variabilité naturelle climatique a engendré des modifications importantes dans 5% seulement de la superficie totale des océans durant la période 1960-2013 et les changements climatiques (naturels et anthropiques) ont provoqué des changements substantiels dans 28% de la superficie totale entre les années 1960 et la période 2006-2013. Si le réchauffement global approche ou dépasse 2°C, les conséquences potentielles deviennent plus importantes et les estimations théoriques indiquent que des changements biologiques substantiels pourraient concerner entre 78 et 94% de la superficie totale des océans. Entre 50% et 70% de cette superficie pourrait en outre connaître des changements biologiques supérieurs ou égaux à ceux observés entre le dernier maximum glaciaire ou le Pliocène moyen et aujourd'hui.

Ces calculs basés sur la théorie écologique (la théorie METAL ; Macro-Ecological Theory on the Arrangement of Life) sont en accord avec ce qu'ont montré les analyses rétrospectives. Le changement climatique provoque différentes réponses du plancton marin. Le premier type de réponse est le changement phénologique. Il s'agit d'un ajustement local de la période reproductive des organismes au cours de l'année. Les changements phénologiques ne sont pas constants parmi les groupes planctoniques. Par exemple, les diatomées marines n'ont que peu modifié leur maximum annuel d'abondance en mer du Nord.

D'autres groupes, tels que les dinoflagellés et le méroplancton (phase larvaire pélagique de certains organismes benthiques tels que les crabes), ont vu leur maximum saisonnier progresser d'un mois entre 1958 et 2002. Beaucoup de diatomées forment des spores, lesquelles sont déposées dans les sédiments durant l'hiver. La germination de ces spores ou le développement des diatomées marines au printemps sont d'avantages contrôlés par des paramètres tels que la longueur du jour et l'intensité de la lumière. Par conséquent, le changement climatique affecte moins ces organismes. Par contre, les dinoflagellés et le méroplancton, qui dépendent d'avantage des caractéristiques physiques de la colonne d'eau (température et stratification) susceptibles d'être influencées par le changement climatique, semblent être plus sensibles. La spécificité de la réponse des groupes d'organismes, liée aux caractéristiques de leur cycle de vie, va provoquer des perturbations de la trophodynamique (relation trophique entre les groupes d'espèce) dans les écosystèmes marins.



Mélange de Protistes (Atlantique)

² Ectothermes : organismes ayant la température de leur environnement

Le deuxième type de réponse du plancton face au changement climatique global est le déplacement horizontal des espèces vers les pôles. Des mouvements biogéographiques rapides du zooplancton caractérisant les eaux chaudes dans le bassin ouest européen ont été constatés le long des côtes européennes entre les latitudes correspondant au sud du golfe de Gascogne et le sud des côtes norvégiennes. Un groupe d'espèces autrefois présent uniquement dans le golfe de Gascogne est maintenant identifié jusqu'à l'ouest des côtes norvégiennes. Les espèces indicatrices de masses d'eau plus froides ont quant à elles diminué. Les écosystèmes planctoniques n'ont pas été les seuls à subir de profondes modifications de leur biodiversité. De nombreuses études ont rapporté l'apparition dans le golfe de Gascogne d'espèces de poissons tropicaux, leur migration progressive le long du talus continental européen ainsi que la migration vers le nord d'espèces de poissons caractérisant les eaux plus chaudes en mer du Nord. Les espèces caractérisant les eaux chaudes étant plus nombreuses que les espèces froides, ces mouvements biogéographiques se sont accompagnés d'une augmentation de la biodiversité de certains groupes phytoplanctoniques et zooplanctoniques dans l'océan Atlantique-Nord.

L'augmentation de la biodiversité, à défaut d'être bénéfique, constitue l'empreinte d'un changement structurel profond des systèmes planctoniques en Atlantique Nord. En effet, l'augmentation de diversité s'est accompagnée d'une réduction de la taille moyenne des copépodes, petits crustacés importants pour la nourriture des petits poissons ou larves de poisson. Plus d'une centaine d'espèces de ce groupe peuplent cette partie de l'océan mondial, assurant le transfert entre les producteurs primaires (phytoplancton) et les niveaux trophiques supérieurs. Cette diminution de taille moyenne indique une réduction potentielle de l'exportation de carbone depuis la surface jusqu'au fond des océans ainsi qu'une augmentation du métabolisme³ de l'écosystème.

Cette zone de l'océan mondiale participe activement à la régulation du dioxyde de carbone atmosphérique, absorbant près du quart des émissions anthropogéniques que l'océan prélève à l'atmosphère chaque année. Les modèles biogéochimiques actuels prévoient un affaiblissement du puits de carbone dans l'océan Atlantique par l'action de la température sur la stratification de la colonne d'eau. La stratification accrue de l'océan de surface va probablement conduire à une diminution des concentrations en éléments nutritifs dans la couche de surface et par conséquent à une diminution de la productivité marine. En plus de ce phénomène, l'augmentation de la diversité souvent associée à une diminution de la taille moyenne du plancton marin accélérera le phénomène en changeant la composition du plancton et en réduisant l'exportation du carbone dans les couches profondes. Cet effet sera cependant difficile à quantifier.

Les scientifiques ont également identifié une relation inverse entre la biodiversité zooplanctonique et la probabilité de présence des morues dans l'océan Atlantique Nord Est, suggérant que l'augmentation de la diversité et la diminution de sa taille se traduit par une réduction de la probabilité de présence de ce poisson subarctique amplifiant l'effet de la surexploitation. En mer du Nord, la biomasse totale des morues a diminué. En plus des effets directs liés à la pêche, les morues ont été victimes d'un changement de composition planctonique qui a affecté la survie des larves. En effet, la période d'apparition des proies zooplanctoniques des larves de morue méroplanctoniques a été altérée suite aux remplacements progressifs des espèces subarctiques par des espèces tempérées. Les conséquences de l'élévation des températures pour les morues sont doubles. Les larves de morues ont augmenté leur métabolisme en raison de l'élévation des températures et par conséquent leur demande énergétique. Cependant, l'énergie disponible a diminué en raison de l'affaiblissement du nombre de proies lorsque les larves sont présentes dans la colonne d'eau. Le déséquilibre énergétique s'est donc accru réduisant la croissance et donc la survie des larves. Ce phénomène a été aggravé par la surpêche.

Toutes ces modifications de biodiversité s'accompagneront ainsi de changements significatifs en termes de services écosystémiques. Les changements de biodiversité traduisent la réorganisation globale des espèces dans l'océan, y compris celles qui sont exploitées (pêche, aquaculture), celles qui sont potentiellement dangereuses pour l'homme (méduses et autres organismes planctoniques, crabes toxiques ou mortels pour l'homme, poissons dangereux) et celles bénéfiques (complément alimentaire, médicaments). Si le réchauffement climatique n'est pas maintenu en deçà de 2°C, l'environnement marin deviendra bien différent de celui que nous connaissons actuellement, ce qui aura des conséquences pour la vie humaine. En effet, l'homme a parfois tendance à oublier qu'il évolue et qu'il est en équilibre avec son environnement. Si la vie autour de lui change trop rapidement et fortement, nos sociétés auront du mal à s'adapter face aux nouvelles conditions environnementales et leurs conséquences sur la biodiversité.

³ Métabolisme de l'écosystème : vitesse à laquelle le carbone biogénique circule dans la colonne d'eau.



LES HERBIERS : CONSÉQUENCES POSSIBLES DU CHANGEMENT GLOBAL

Gérard Pergent



Rhizomes de Posidonies (Méditerranée)

Les herbiers de magnoliophytes, et en particulier de Posidonies, sont aujourd'hui considérés comme des écosystèmes particulièrement importants au regard des services écosystémiques qu'ils apportent, qui s'étendent de la production de matières premières et de nourriture, la protection du littoral contre l'érosion, la purification de l'eau, le piégeage du carbone jusqu'au maintien de la pêche, du tourisme, des loisirs, de l'éducation et de la recherche (Vassallo et al., 2013). Ce sont ces services que le changement global est susceptible de remettre en cause, d'autant que la distribution des herbiers, en zone littorale, les rend particulièrement sensibles aux pressions humaines ; ceci est corroboré, à l'échelon planétaire, par des régressions significatives de leur distribution (Waycott et al., 2009).

Néanmoins, au regard de la variabilité naturelle de ces écosystèmes, de la multiplicité des pressions qui s'exercent et de la quasi-absence de connaissance des mécanismes de synergie qui peuvent exister entre ces différentes pressions, il apparaît encore difficile de prédire la réponse des herbiers aux changements globaux. Chez la Posidonie on note par exemple, une certaine résilience à la température, à la plupart des contaminants, à l'ancrage et aux espèces invasives, mais en revanche faible pour la salinité, la turbidité, les déséquilibres sédimentaires et le chalutage (Pergent et al., 2012).

Si l'acidification générale de l'océan ne semble pas, tout au moins au regard des données disponibles, de nature à perturber significativement les herbiers de magnoliophytes marines, qui sont naturellement soumis à des variations de pH, en revanche de fortes présomptions existent quant à l'impact négatif de l'élévation de la température - notamment les espèces à affinités froides - du niveau de la mer et de la fréquence des événements climatiques extrêmes.

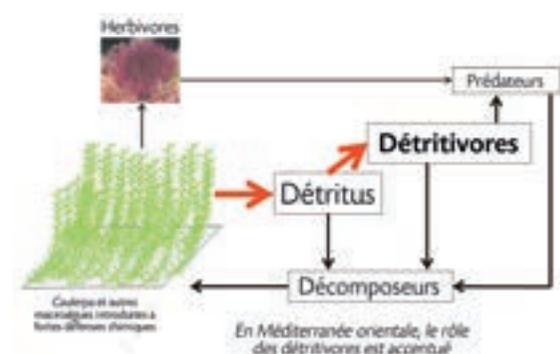
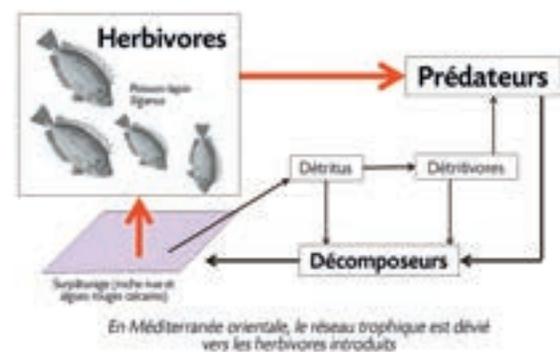
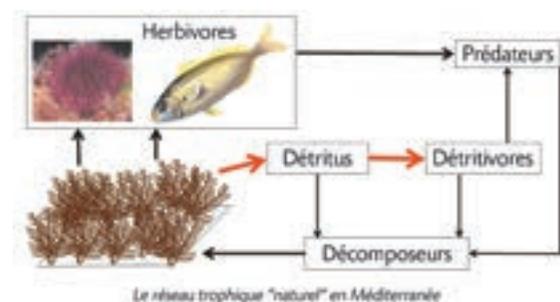
Les caractéristiques écologiques des magnoliophytes marines leur permettent de couvrir un large spectre de conditions abiotiques aussi, lorsque les conditions de milieu deviennent défavorables pour une espèce, celle-ci peut être remplacée par une autre. Ainsi, en Méditerranée, les espèces à affinité chaude (*Cymodocea nodosa* ou *Halophila stipulacea* - espèce introduite de Mer Rouge) réagissent positivement au réchauffement des eaux alors que les espèces à affinité plus tempérée (herbiers de *Zostères* - *Z. noltei* et *Z. marina*) montrent des régressions significatives dans les secteurs où les températures sont plus élevées. Mais le remplacement de la Posidonie (espèce ingénieur climacique, présentant une forte complexité structurale) par des espèces de plus petite taille, non-structurantes pourrait entraîner une profonde modification de l'écosystème et des services écosystémiques associés. De même, les anomalies thermiques, observées en périodes estivales en 2003 et 2006, semblent à l'origine d'une diminution de la vitalité de l'herbier aussi bien dans sa partie superficielle (Marbà and Duarte, 2010) que dans sa partie profonde (Mayot et al., 2005).

Enfin une régression significative de la limite inférieure de l'herbier (partie la plus profonde), décelée dans le cadre du Réseau de Surveillance du littoral de la Corse, a pu être mise en relation avec une augmentation du niveau moyen de la mer au cours des dix dernières années (Pergent et al., 2015), laissant envisager une régression généralisée des herbiers profonds en réponse à la montée du niveau de la mer. La régression de ces herbiers constituerait non seulement une perte nette en terme de puits de carbone, mais également un risque indirect de relargage de tout ou partie du carbone séquestré dans les mattes, mais également des contaminants, piégés au sein de ces structures, au cours du temps.

LES INVASIONS BIOLOGIQUES

Charles François Boudouresque

Parmi les bouleversements induits par les changements globaux, les invasions biologiques figurent en bonne place et la Méditerranée en est un bon exemple.



Une espèce est dite 'introduite' lorsque l'homme, volontairement ou non, lui a permis de s'installer dans une région nouvelle, et qu'elle y est naturalisée, c'est-à-dire qu'elle se reproduit sans l'aide de l'homme. Elle est qualifiée d'invasive lorsqu'elle nuit aux espèces ou aux écosystèmes en place, lorsque sa présence génère des coûts économiques sérieux ou qu'elle détermine des problèmes de santé humaine.

Un millier d'espèces exotiques sont présentes en Méditerranée, dont plus d'une centaine peuvent être qualifiées d'invasives. La Méditerranée est ainsi la région la plus affectée au monde par ce phénomène. Comment sont-elles arrivées ? Principalement par le canal de Suez, par l'aquaculture d'espèces originaires du Pacifique, transportées sur la coque des bateaux, dans les eaux de ballast de ces mêmes bateaux, ou bien en s'évadant d'aquariums.

Les écosystèmes côtiers méditerranéens sont caractérisés par une relative pauvreté en herbivores ; comme en milieu terrestre, la part de la production photosynthétique non consommée par des herbivores s'accumule dans la litière, sous forme de débris ; elle y est consommée par des détritivores (mangeurs de débris) et recyclée par des décomposeurs (en particulier des bactéries).

Les invasions ont tout bouleversé :

- En Méditerranée orientale, l'arrivée depuis la mer Rouge d'herbivores voraces, dont les poissons-lapins *Siganus*, qui prolifèrent, provoque un incroyable surpâturage des fonds et a dévié le réseau trophique vers la voie des herbivores et de leurs prédateurs.
- En Méditerranée occidentale, l'arrivée (rejets d'aquariums ou fixés sur la coque des bateaux) de macroalgues puissamment défendues par des toxines, ce qui les rend à peu près inconsommables par les herbivores, a au contraire dévié le réseau trophique vers la voie des détritivores.

Dans les deux cas, les écosystèmes sont complètement transformés. Cet impact est très largement supérieur à celui de la pollution (locale et réversible) ou même (pour le moment) du réchauffement des eaux.



Un fond méditerranéen couvert par une algue rouge introduite, *Womersleyella*, toxique et donc inconsommable pour les herbivores

LES PERTURBATIONS DIMINUENT-ELLES LE NOMBRE DES ESPÈCES ?

L'idée qu'une perturbation « appauvrit » toujours un écosystème, par exemple en diminuant le nombre des espèces, est une notion naïve avancée par les écologistes des années 1960s, progressivement abandonnée, mais qui continue à être propagée par la vulgarisation. Une perturbation peut accroître ou diminuer le nombre des espèces. Beaucoup d'écosystèmes à grande valeur patrimoniale sont pauvres, ou très pauvres, en espèces. L'effet des perturbations est souvent d'accroître le nombre des espèces. Un raccourci délibérément provocateur : la façon la plus simple « d'enrichir » un écosystème est d'y placer une décharge d'ordures ! Pour un écosystème, le « bon » nombre d'espèces n'est ni faible, ni élevé : c'est celui que le milieu naturel et l'évolution ont déterminé

LES TERMES LIÉS À LA THÉORIE DES PERTURBATIONS

Une population, de même qu'un écosystème, fluctue toujours au cours du temps, même en l'absence de changement des forçages environnementaux. Ces fluctuations sont dues à des processus endogènes (i.e. internes), par exemple des propriétés émergentes de la population ou de l'écosystème, comme une succession ou un mécanisme évolutif. On désigne sous le nom de persistance l'amplitude de ces fluctuations d'origine endogène.

La résilience est l'amplitude maximale du forçage environnemental pour laquelle il y a réaction de la population ou de l'écosystème (donc un changement supérieur à la persistance), mais pour laquelle le système n'est pas détruit, et est capable de retourner à son état moyen antérieur. Si le forçage environnemental est supérieur à la résilience, l'écosystème est détruit, ou profondément modifié, de telle sorte qu'il est remplacé par un autre écosystème ; les modalités du retour à l'état moyen antérieur, ou à un état alternatif, via une succession d'écosystèmes, sont nommées succession secondaire ou succession primaire.

Dans un écosystème donné, une perturbation est une déviation imprédictible et de durée déterminée d'un forçage environnemental pour lequel il y a une réaction de l'écosystème (ou sa destruction), donc un forçage supérieur à son inertie et/ou à sa résilience. Cette réaction concerne un ingénieur d'écosystème, une ou plusieurs espèces-clé, une guilda ou un compartiment fonctionnel de l'écosystème.

Un ingénieur d'écosystème est un organisme qui, directement ou indirectement, module la disponibilité des ressources (autres que la ressource qu'il peut constituer lui-même), pour les autres espèces, en provoquant des changements physiques dans le matériel biotique ou abiotique. Une espèce-clé est une espèce qui joue, dans un écosystème, un rôle important, beaucoup plus important que son abondance ne le laisserait présager ; le terme d'espèce clé de voûte, initialement défini dans un autre contexte, est aujourd'hui utilisé dans le même sens qu'espèce-clé.

Si l'impact d'un forçage ne concerne pas des espèces, ou des groupes d'espèces, qui jouent un rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème, il ne peut pas être qualifié de perturbation pour l'écosystème.

D'après : « les termes liés à la théorie des perturbations » C.F Boudouresque et M.A Mateo in Pergent et alii, 2012. Les herbiers à magnoliophytes de Méditerranée (...) UICN publ., Málaga

LES MANGROVES : ENTRE CROISSANCE ET RÉGRESSION

Cyril Marchand

La mangrove figure parmi les écosystèmes les plus menacés en raison de la croissance de population en zone côtière et de sa surexploitation : besoins en bois pour l'énergie, conversion de terrain pour l'élevage, pour la production de riz, de sel, ou pour l'aquaculture. Ces activités anthropiques ont contribué à une diminution drastique de la surface mondiale des mangroves durant les dernières décennies ; 50% de ces destructions seraient dues à la déforestation pour l'aquaculture de crevettes. La mangrove disparaît à raison de 1 à 2% par an, ce taux passant de 1,7% par an durant la décennie 1980-1990 et à 1% par an de 1990 à 2000 : la Thaïlande, les Philippines et l'Equateur ont ainsi perdu plus de la moitié de leur superficie de mangrove.

Cette déforestation menace la survie des espèces qui y sont inféodées, contribue à l'érosion des littoraux, à leur salinisation et menace la sécurité humaine, limitant notamment la protection contre les événements cycloniques et les tsunamis.

En réduisant les habitats, les zones de nurserie et les sources de nourritures, la perte de mangrove se traduira par une réduction des ressources pour les communautés humaines qui en dépendent. Finalement, la destruction de la mangrove induira la libération de grandes quantités de carbone stocké dans leurs sols, qui retournera dans l'atmosphère sous forme de CO₂.

Les changements climatiques, accompagnés de hausses de température, de la montée du niveau de la mer et de l'augmentation des concentrations en CO₂, sont susceptibles de modifier fortement la distribution, la zonation et les fonctions assurées par cet écosystème ; notamment, sa capacité à fixer le CO₂ pourrait être accrue. Les paramètres agiront de façon différenciée.

L'augmentation de température pourrait augmenter la productivité des palétuviers (forte influence sur la photosynthèse), mais surtout contribuer à élargir la distribution latitudinale des mangroves, celles-ci se développant dans des zones où il ne gèle pas, et où la température de l'eau de mer est supérieure à 18°C durant le mois le plus frais. L'augmentation des précipitations dans la zone inter-tropicale devrait également favoriser la croissance des palétuviers en limitant l'énergie qu'ils doivent déployer pour lutter contre la forte salinité des sols, liée à l'évaporation.

Parmi les différents scénarii d'évolutions des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère, le plus probable atteint 500 ppm en 2050, et plus de 800 ppm à la fin du siècle. On peut alors s'attendre à un effet direct du taux de CO₂ atmosphérique sur la productivité de certaines espèces de mangrove. Des concentrations élevées en CO₂ pourraient induire un changement substantiel de la végétation le long des gradients de salinité dans la zone intertidale. D'une manière générale l'augmentation de la concentration en CO₂ devrait stimuler la photosynthèse et par conséquent la capacité de fixation du carbone des écosystèmes.

L'élévation globale du niveau des mers est considérée comme la principale menace pour les mangroves, hors pression anthropique directe, car elle induira leur dépérissement par asphyxie, si l'élévation du niveau du sol par sédimentation ne suit pas le rythme de la montée des eaux. Ce processus engendrerait une disparition de près de 20% des mangroves dans le Pacifique Sud dans les décennies à venir.

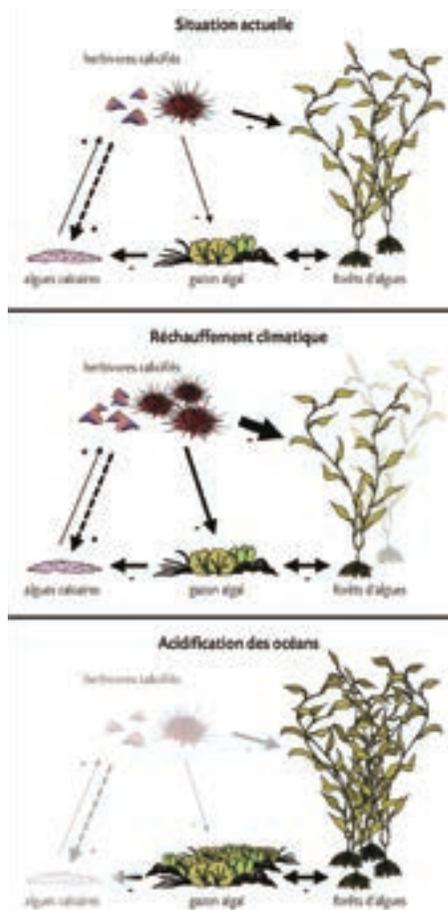
A l'échelle mondiale, toutefois, la surface recouverte par les mangroves pourrait croître, en raison de l'augmentation des surfaces disponibles sur les plates-formes continentales et parce que les conditions climatiques favoriseront leur développement dans des zones nouvelles. Cependant, la montée des eaux obligera les mangroves à reculer vers les terres, et actuellement les zones d'arrière mangrove sont très peuplées, notamment par des mégapoles en Asie. Mangroves et zones urbaines pourront-elles cohabiter?

L'ÉVOLUTION DES ALGUERAIES SOUS CHANGEMENT CLIMATIQUE

DES RÉPONSES CONTRASTÉES

Claude Payri

Les réponses physiologiques des macroalgues à l'élévation de la température et à l'augmentation de l'acidification des océans sont encore mal connues et l'on peut s'attendre à des réponses différentes en fonction des régions et des communautés algales (Harley et al., 2012).



En théorie, on peut s'attendre à ce que l'augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique et dissous favorise la photosynthèse et la croissance des algues et à ce que les macroalgues formant les canopées en surface et pouvant exploiter le dioxyde de carbone à l'interface eau-air, bénéficient le plus directement de cette augmentation, par accroissement de biomasse. (Laffoley and Grimsditch, 2009). Plusieurs scénarios ont été proposés par la Convention sur la Diversité Biologiques (2010) en considérant que la capacité de séquestration du carbone est déterminée par le niveau trophique des organismes affectés par le changement climatique.

Dans le cas où les prédateurs apicaux seraient affectés, la pression sur les herbivores diminuerait, favorisant ainsi le broutage des algues et réduisant le stockage de carbone.

A contrario, si les herbivores à la base de la chaîne alimentaire sont affectés, alors la pression de prédation sur les producteurs primaires serait réduite, favorisant le développement algal et, par effet de cascade, la séquestration de carbone augmenterait. Ces hypothèses font abstraction des capacités physiologiques des macroalgues et des réponses des espèces aux effets séparés et combinés de l'augmentation de la température et de l'acidification des océans.

Il est donc très difficile voire hasardeux de prédire l'effet du changement climatique sur ces écosystèmes complexes et très dynamiques dont certains, comme les grandes forêts de macroalgues des hautes latitudes sont d'ores et déjà impactés par les activités humaines (Steneck et al. 2002).

Source : Coyle T.A & Graham M.H. (2012). Les flèches et leur épaisseur traduisent l'intensité de pression des brouteurs ; le signe - indique la pression (effet négatif) + indique un effet positif ; les flèches horizontales traduisent la compétition entre les différents compartiments d'algues.

DES MIGRATIONS ANNONCÉES

Valérie Stiger-Pouvreau

Les côtes bretonnes se situent dans une zone de transition entre la région tempérée froide et la région tempérée chaude. Cette situation explique la forte diversité spécifique aussi bien animale que végétale, avec des espèces à affinité méridionales et septentrionales venant des deux éco-régions, dont les limites de répartition se situent en Bretagne. A titre d'exemple, *Laminaria ochroleuca*, « laminaire jaune », abondante dans le sud de l'Europe jusqu'aux côtes marocaines, est observée en Bretagne où elle atteint sa limite nord. C'est une espèce à affinité méridionale. Inversement, des espèces à affinité septentrionale, comme *Alaria esculenta* et *Laminaria digitata* « laminaire flexible », atteignent le sud de leur limite de répartition (Lüning 1990) en Bretagne.

Parmi les divers scénarios du changement climatique émis par le GIEC, il est prédit une augmentation de la température de l'eau de mer en Atlantique nord, dont les effets risquent de décaler la distribution des espèces et modifier la structure des populations. On peut ainsi se poser la question de l'impact induit sur les espèces dont la limite de répartition se situe en Bretagne.

L. digitata est une espèce d'algue brune de l'étage infralittoral, exploitée pour l'extraction de ses alginates, à hauteur de 60 000 T d'algues récoltées par an. Le cycle de reproduction de *L. digitata* comprend deux générations, un sporophyte macroscopique, qui peut vivre dans des eaux atteignant 18-20°C et une génération gamétophytique, microscopique qui se reproduit en eau froide (température autour 10°C). L'espèce va-t-elle migrer plus profondément dans la colonne d'eau, vers des zones plus froides mais où les conditions de lumière ne seront pas optimales ? ou bien va-t-elle disparaître, les gamétophytes ne pouvant plus se reproduire ? Des travaux récents ont montré une augmentation de la vulnérabilité des populations (perte de fertilité des sporophytes) en limite sud de distribution face aux facteurs de stress (Oppliger et al. 2014). Le changement global pourrait donc conduire à une baisse de productivité des populations du sud liée à l'interaction entre effets de la température, actions anthropiques, compétition avec des espèces mieux adaptées comme une autre algue brune *Sacchariza polyschides* (Valero et collaborateurs, projet ecokelp). Dans ce contexte, les analyses génétiques laissent entrevoir une diminution des capacités adaptatives de ces populations puisqu'elles se caractérisent par une plus faible diversité associée à plus fort isolement génétique (Oppliger et al. 2014).

Au sud de l'Europe, le long des côtes Atlantiques de la péninsule ibérique (Voerman et al., 2013) ainsi que dans d'autres régions du monde, comme par exemple en Australie (Wernberg et al. 2011), la distribution de certaines de ces grandes algues brunes s'est déjà modifiée, entraînant un bouleversement de l'écosystème avec des impacts potentiels sur les espèces commerciales. Les facteurs responsables sont toujours à l'étude, mais convergent tous vers un impact des activités anthropiques et du changement global.

Ainsi, on a pu montrer que la diversité des espèces d'algues rouges associées à ces forêts de laminaires en Bretagne a été modifiée sur un intervalle de 20 ans, entre 1990 et 2010, en raison probablement d'une augmentation moyenne de 0,7°C des eaux côtières (Gallon et al. 2014). Néanmoins, les effets de ce réchauffement ne se produisent pas de façon uniforme le long des côtes. Ainsi l'étude de Gallon et al. (2014) montre qu'ils se font moins ressentir dans la partie Nord/Nord-Ouest de la Bretagne, par rapport aux zones situées au nord ou au sud de cette poche d'eaux froides. La Bretagne Nord/Nord-Ouest pourrait ainsi représenter une zone refuge face au changement climatique ou plutôt une barrière climatique piégeant les espèces dans cette zone lors de leur migration vers le nord.

L'INVASION DES SARGASSES

Franck Mazeas

Les algues brunes du genre *Sargassum* forment des populations denses constituant des radeaux flottants qui se déplacent à la surface des océans. Ces radeaux aujourd'hui parfois gigantesques (plus de 500 km de long) traversent l'Atlantique et s'observent depuis le large du Brésil, où s'étend une « petite mer des sargasses », jusqu'aux îles du Nord de l'arc antillais. Depuis 2011, des échouages massifs de Sargasses, *Sargassum fluitans* et *Sargassum natans*, affectent périodiquement les littoraux de toutes les îles de l'arc antillais. Les échouages en Guadeloupe et en Martinique sont estimés à plus de 50 000 tonnes de matière sèche en 2015. Ces échouages ont un impact sur l'environnement marin (biodiversité marine), l'économie (pêche, tourisme, navigation), et potentiellement sur la santé humaine du fait d'émanations d'hydrogène sulfuré (H₂S).

Le caractère inhabituel de cet événement pourrait être associé à de plus grandes fluctuations de la dynamique des écosystèmes régionaux, notamment en lien avec le dérèglement climatique qui pourrait influencer sur les courants marins. Les algues bénéficieraient d'apports massifs en nutriments par l'Amazonie, du fait de l'extension de l'agriculture et de la déforestation du massif amazonien et de l'augmentation de la température des eaux tropicales sous l'effet du réchauffement climatique. Les hypothèses se portent également vers les côtes africaines de Sierra Leone et du Nigeria, où les radeaux d'algues seraient enrichis par les nutriments des fleuves Niger et Congo et transportés par le courant nord-équatorial vers l'arc caribéen.



Radeaux flottants de Sargasses (Caraïbes)

LES ALGUES ROUGES CALCAIRES

Claude Payri

Parmi les macroalgues, certaines familles ont la particularité de précipiter du carbonate de calcium et de former une trame calcaire. C'est le cas notamment des algues rouges Corallinacées dont certaines forment de véritables pierres calcaires vivantes tandis que d'autres sont ramifiées et restent souples grâce à des articulations dépourvues de calcaire. Elles sont dites articulées. Les algues rouges calcaires sont présentes sous toutes les latitudes, depuis les champs de maërl des hautes latitudes, le coralligène de Méditerranée jusqu'aux zones tropicales où elles ont un rôle majeur dans la formation, la consolidation et le maintien des récifs coralliens.

En zones tempérées et froides, certaines d'entre elles se développent sous la canopée des forêts d'algues, où elles jouent un rôle important pour le recrutement des jeunes plantules ; d'autres forment des champs de nodules compacts ou branchus (maërl) et constituent des habitats essentiels pour de nombreux juvéniles de poissons et d'invertébrés.

De manière générale, ces algues calcaires contribuent aux flux de nutriments ainsi qu'au cycle du carbone et des carbonates des zones côtières, par le jeu de la calcification et de la dissolution du CaCO_3 . Dans certaines zones, elles participent activement à la formation des sables. Plusieurs travaux ont souligné l'importance des algues rouges calcaires en tant que productrices de carbonates. Un tiers de la production totale actuelle de carbonates dans les océans proviendrait des milieux côtiers non tropicaux et serait essentiellement composé de Corallinacées.

Les données disponibles estiment le dépôt de carbonate de calcium par les algues calcaires à plus de 4kg/an/m^2 en zones tempérées et tropicales (Smith, 1972 ; Freiwald and Henrich, 1994 ; Chisholm, 2000 ; Schafer et al 2011). Ces chiffres pourraient être dépassés en considérant les algues calcaires articulées (Fisher & Martone, 2014).

Si l'acidification des océans est susceptible d'impacter toutes les espèces marines, ce sont les organismes calcifiants qui y seront certainement les plus sensibles. Les études menées depuis 2009 sur les effets de l'acidification aussi bien dans les récifs coralliens que dans les régions tempérées, et à moindre échelle dans les régions froides, montrent des réponses variables en fonction des espèces. Si certaines d'entre elles accusent une forte diminution de la photosynthèse et de la calcification dans des conditions de pCO_2 élevée, d'autres semblent mieux résister à la diminution du pH.



De plus en plus nombreuses, les études montrent qu'il n'y a pas de réponse standard des espèces de Corallinacées face à l'acidification des océans. Ces réponses varient en fonction du stade de leur cycle de vie, de la physiologie des espèces -notamment de leur capacité à réguler le pH au niveau cellulaire- de leur histologie, avec la présence d'une couche organique protectrice, et de la forme de CaCO_3 précipitée ; mais aussi des adaptations développées au cours de l'histoire de vie environnementale. Elles dépendent aussi fortement des paramètres expérimentaux. De plus, les interactions entre la photosynthèse et la calcification, donnent lieu à des réponses complexes dont les mécanismes ne sont pas encore bien compris. Aussi, est-il hasardeux de généraliser la réponse des algues calcaires à partir d'exemples expérimentaux particuliers.

Alors que les Corallinacées étaient considérées parmi les organismes les plus sensibles à l'acidification des océans, en raison principalement de leur squelette en calcite magnésienne, forme la plus soluble, des études récentes montrent de véritables capacités d'adaptation de certaines espèces à la diminution du pH. La découverte récente de dolomite dans la composition des trames calcaires amène notamment les scientifiques à réviser le jugement général de sensibilité de ces espèces dans un contexte d'acidification des océans.

L'acidification future des océans et les conséquences sur les équilibres de la chimie des carbonates induiront sans aucun doute des changements majeurs dans les écosystèmes marins. Cependant, la connaissance des mécanismes sous-jacents à ces changements, des différentes sensibilités liées aux espèces et des conséquences évolutives sont encore balbutiantes et fragmentaires. Plusieurs travaux conjuguant les diverses caractéristiques physiologiques des espèces et les variations des conditions du milieu sont nécessaires pour tenter de comprendre le devenir des algues rouges calcaires dans de telles conditions.



LES CORAUX : QUELQUES GAGNANTS ET BEAUCOUP DE PERDANTS

Denis Allemand

Depuis ces 420 000 dernières années (Hoegh-Guldberg 2011), les récifs coralliens n'ont jamais été confrontés à de telles conditions de réchauffement global et d'acidification des océans.

Les paramètres physico-chimiques conditionnent en grande partie la distribution des organismes au sein des écosystèmes. Les coraux constructeurs de récifs n'échappent pas à cette règle : ils sont ainsi répartis dans les eaux tropicales et subtropicales à des températures comprises entre 22 et 29°C. Une augmentation de température de seulement 1°C pendant plusieurs jours au-delà d'environ 30°C provoque la rupture de l'association symbiotique qui unit le corail avec les microalgues, Dinoflagellés (encore appelées zooxanthelles). Ces dernières vivent à l'intérieur des cellules de leur hôte et assurent une grande partie de ses besoins métaboliques. Privé de ses symbiotes, le corail perd ses couleurs et « blanchit » (on parle ainsi de « blanchissement » du corail) puis meurt si la température ne revient pas en quelques jours à son niveau initial. Le blanchissement des coraux est le seul phénomène consécutif aux changements climatiques, visible à l'œil nu en quelques jours.

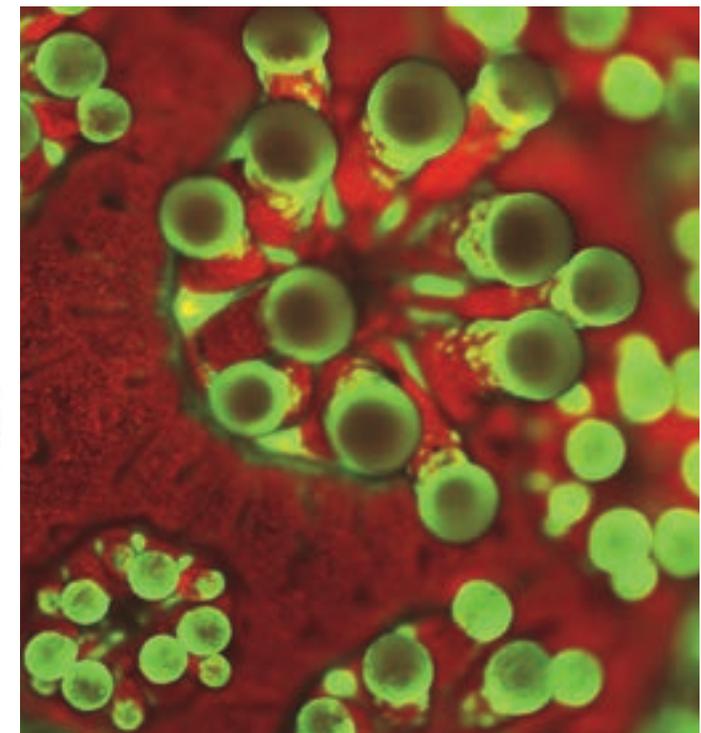
Le pH est un autre paramètre important pour la vie des organismes : il régule de nombreux processus comme la conformation des protéines et donc l'activité des enzymes et par conséquent la physiologie des organismes, comme la croissance, la reproduction, le comportement ou la calcification. Chez la majorité des coraux étudiés, l'acidification des océans inhibe leur calcification, et donc la croissance récifale.

Si les perturbations environnementales altèrent de façon similaire la majorité des coraux, des études récentes montrent de grandes hétérogénéités inter ou intra-spécifiques tant au niveau de la température que du pH. Dans les deux cas, il y aura des gagnants et des perdants, suggérant que la composition des récifs coralliens à la fin de ce siècle sera très différente de la composition actuelle. Pour avoir une idée de cette composition, on peut comparer les récifs du futur aux récifs actuellement soumis à des pH de l'ordre de 7,8 comme les récifs de Papouasie Nouvelle-Guinée. Si ces récifs parviennent à maintenir une couverture corallienne importante, ils sont principalement constitués de coraux massifs et n'abritent que très peu d'espèces animales. Quand on sait que les récifs hébergent aujourd'hui environ 1/3 de la biodiversité marine connue, on peut imaginer que les océans connaîtront une grave crise d'extinction de cette biodiversité. Mais, cet effet ne se restreindra pas uniquement à la perte de la biodiversité : il entraînera aussi la perte de tous les services écosystémiques liés à ces espèces, comme l'attrait touristique des régions coralliennes, les pêches, la protection des côtes contre l'érosion. La subsistance de plus de 100 millions de personnes dépend en effet directement des récifs, dont la valeur des services rendus annuellement est estimée à un peu plus de 172 milliards de dollars. L'idée que le réchauffement des eaux puisse permettre aux coraux de migrer vers les hautes latitudes doit être abandonnée car c'est oublier que le corail ne peut se passer pour vivre des luminosités tropicales.

La vitesse des changements rend difficile une adaptation des coraux. Cependant, il apparaît clairement que certaines populations de coraux sont adaptées naturellement à des conditions inhabituelles de température ($\approx 30^\circ\text{C}$) et/ou de pH (7,84), comme à Palau ou dans le golfe Persique, où ils ne commencent à blanchir qu'à des températures supérieures à 34-35°C. Ces populations pourraient peut-être servir de pépinières pour une « évolution assistée » des coraux. D'autre part, il a été montré récemment qu'une même colonie pouvait montrer une hétérogénéité génétique, susceptible alors de s'adapter plus rapidement que prévu aux variations rapides des paramètres externes. Le Centre Scientifique de Monaco cultive depuis 25 ans dans ses locaux des coraux *Stylophora pistillata*, l'une des espèces de coraux les plus utilisées comme modèle d'étude en laboratoire. Afin de tester leur tolérance à l'acidification des océans, quelques colonies sont cultivées à un pH de 7,2, valeur extrêmement basse, alors que beaucoup d'espèces meurent à partir du pH 7,6 – 7,4. L'étude des mécanismes de tolérance de ce corail pourra peut-être permettre de mieux gérer l'avenir des récifs coralliens.

DES RÉCIFS CORALLIENS EN MÉDITERRANÉE ?

Le réchauffement climatique provoque des migrations des organismes vers des altitudes et des latitudes plus hautes, pourrait-il en être de même pour les coraux ? Une étude récente (Muir et al 2015) montre que la quantité de lumière disponible pour assurer la photosynthèse des symbiotes des coraux constructeurs de récifs diminue trop fortement au fur et à mesure où l'on s'éloigne de l'équateur pour assurer la croissance corallienne. Nous ne verrons donc pas des récifs coralliens en Méditerranée à cause du réchauffement climatique. Les coraux constructeurs de récifs semblent malheureusement condamnés à voir leur aire de distribution se réduire d'années en années...



Stylophora pistillata



LES POISSONS CORALLIENS : DES DÉSÉQUILIBRES EN CASCADE

Michel Kulbicki

La biodiversité est en changement perpétuel depuis des milliards d'années. Nous assistons cependant actuellement à une accélération sans précédent de ces changements avec des conséquences potentiellement dramatiques.

Les poissons coralliens, qui représentent la communauté de vertébrés la plus diversifiée au monde, peuvent servir d'exemple de certains types de changement essentiels. Ces poissons sont soumis à de très nombreuses contraintes, comme la pêche, les changements de climat ; ou encore la pollution, dont les effets sont mal cernés, avec une action à la fois directe (par exemple baisse de fécondité) et indirecte (altération de l'habitat ou de la nourriture des poissons).

La pêche ne capture pas les poissons au hasard. Trois critères gouvernent la pêche en milieu corallien : la qualité du poisson, son abondance et son accessibilité. La plupart des consommateurs préfèrent les poissons carnassiers aux poissons herbivores ou planctonophages. En conséquence, la pêche entraîne très rapidement un déséquilibre des communautés, la disparition des carnivores, naturellement peu nombreux, entraînant des surabondances d'espèces moins désirables, dont les herbivores. Ces derniers sont pêchés à leur tour. Les consommateurs préfèrent cependant les grandes tailles et ce sont donc les grands herbivores qui sont les premiers affectés. Or, ces derniers jouent un rôle central dans les relations entre coraux et algues. Leur baisse d'abondance peut entraîner des développements inconsidérés d'algues. Celles-ci empêchent alors les coraux de s'installer ou de croître, entraînant ainsi une perte de la complexité d'habitat des récifs coralliens ; complexité indispensable pour conserver une forte diversité. On assiste donc à des effets en cascade.

Les changements de température ont deux effets majeurs, d'abord direct en agissant sur le métabolisme des poissons ainsi que sur leurs capacités de dispersion et de colonisation, puis indirect en agissant sur les coraux qui sont le facteur prépondérant dans la structure de l'habitat récifal et donc de la capacité d'accueil pour la biodiversité. Les changements d'aire géographique des poissons sont assez lents, mais l'homme peut les accélérer, comme par exemple en Méditerranée où plus de 90 espèces de poissons de Mer Rouge ont été signalées, certaines devenant de vrais fléaux pour la faune-flore marine locale et pour les pêcheries. Le réchauffement entraîne souvent une diminution des tailles de poissons à maturité sexuelle, un ralentissement de la croissance, et une diminution des tailles moyennes dont les effets combinés peuvent affecter certaines espèces de façon plus importante que pour d'autres.

Mais le réchauffement a surtout un effet sur les coraux qui meurent parfois en abondance suite à l'expulsion de leurs algues symbiotiques. Leur mort entraîne une forte diminution de la complexité des récifs et nombre d'espèces n'y trouvent donc plus un refuge ou une source d'alimentation suffisants ; on assiste à un effondrement de la biodiversité, dont celle des poissons coralliens.

Les changements climatiques ont aussi pour conséquence une intensification de la force et de la fréquence des tempêtes tropicales. Ces dernières détruisent les coraux, surtout dans les zones peu profondes, où se concentrent l'essentiel de la diversité en poissons. A faible fréquence, ces tempêtes tendent à favoriser la diversité en créant des successions écologiques. En revanche si leur fréquence devient trop élevée ces successions ne parviennent pas à leur terme et l'on assiste à une baisse de la complexité récifale et au final une baisse de la diversité de ces poissons coralliens.

Ces trois facteurs, pêche, réchauffement et changements climatiques ont aussi des effets conjugués qui peuvent augmenter considérablement les effets néfastes. Ainsi la pêche excessive d'herbivores a pu par endroits favoriser le développement d'algues, ces dernières étouffent les coraux déjà fragilisés par des températures excessives ou des tempêtes trop fréquentes. Bien que beaucoup de ces changements ne soient pas irréversibles, le retour à des conditions satisfaisantes prend généralement des décennies, si toutefois les systèmes sont suffisamment protégés.

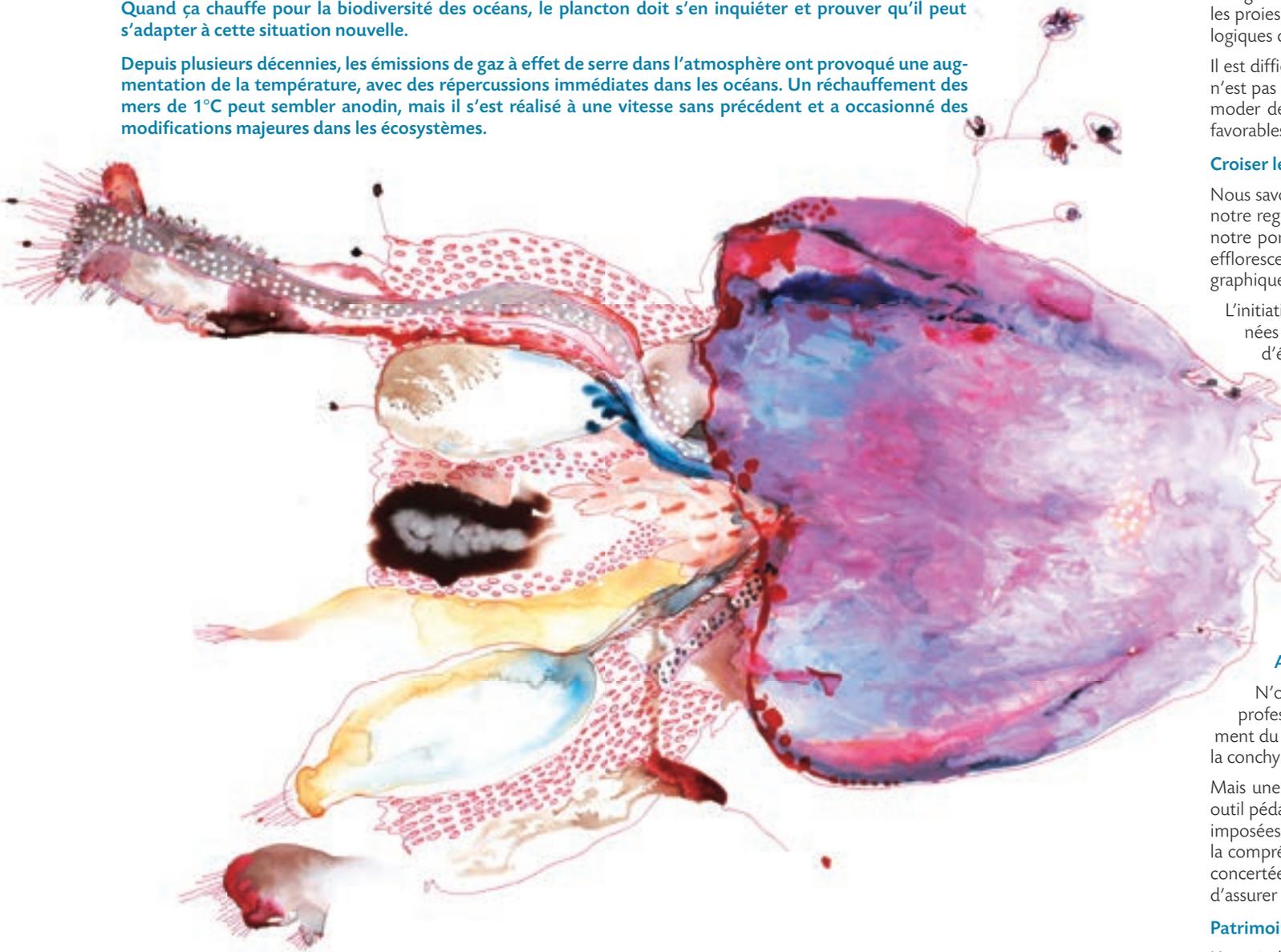


QUAND ÇA CHAUFFE POUR LA BIODIVERSITÉ...

Pierre Mollo

Quand ça chauffe pour la biodiversité des océans, le plancton doit s'en inquiéter et prouver qu'il peut s'adapter à cette situation nouvelle.

Depuis plusieurs décennies, les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont provoqué une augmentation de la température, avec des répercussions immédiates dans les océans. Un réchauffement des mers de 1°C peut sembler anodin, mais il s'est réalisé à une vitesse sans précédent et a occasionné des modifications majeures dans les écosystèmes.



Les impacts directs de la montée du niveau des océans sont la submersion des terrains côtiers, l'érosion côtière et l'accroissement des zones inondables. En corollaire, l'augmentation de la salinité dans les estuaires et les nappes phréatiques côtières. C'est une menace pour les biotopes des deltas tropicaux, là où se situent les mangroves. Or, leur submersion pourrait entraîner une perte de la biodiversité planctonique.

Fondamentalement, le plancton constitue la base de la chaîne alimentaire de tous les organismes marins. Par la photosynthèse, le plancton végétal fournit la plus grande partie de l'oxygène que nous respirons. De plus, absorbant plus de la moitié du dioxyde de carbone de l'atmosphère, il est un élément indispensable de la lutte contre le réchauffement climatique.

Inquiétantes migrations

À la base des réseaux trophiques se trouve le copépode, un passeur du monde végétal (phytoplancton) au monde animal (zooplancton). L'exemple de ce minuscule crustacé est intéressant, car il est contraint de s'adapter à ces changements climatiques. Il doit parfois quitter des milieux familiers devenus hostiles et se déplacer sur des distances considérables. Il y a aussi la très forte compétition des espèces de phytoplancton entre elles, au détriment des autres micro-algues, en particulier des diatomées qui sont la base nutritionnelle des copépodes.

Ainsi, les migrations forcées de certains types de zooplancton imposent à leurs prédateurs des déplacements identiques. Ces mouvements expliquent la forte diminution des populations de morues en mer du Nord, une manne pour les ports de pêche français.

Les réactions en chaîne du plancton face aux modifications climatiques peuvent se rajouter au déséquilibre et dérégler définitivement les populations de crustacés, de mollusques et de poissons. En effet, pour ces animaux, les proies planctoniques ne sont pas toujours interchangeables, en raison de leurs valeurs nutritives et cycles biologiques différents.

Il est difficile de prévoir de quelle manière et à quelle vitesse réagira le plancton dans le futur. Le danger principal n'est pas pour ces minuscules vies marines qui savent s'adapter, mais bien plus pour l'homme qui devra s'accommoder des nouvelles situations halieutiques, avec le risque que les futurs écosystèmes marins lui soient moins favorables.

Croiser les connaissances, multiplier les initiatives

Nous savons, avec Antoine de Saint-Exupéry, que « l'essentiel est invisible pour les yeux ». Il est urgent de porter notre regard sur l'invisible pour voir l'océan d'un œil nouveau. Étudier le plancton par satellite est aujourd'hui à notre portée. Les images prises de l'espace repèrent, grâce à la concentration en pigments chlorophylliens, les efflorescences printanières. Ces observations de la surface de l'eau ne peuvent remplacer les campagnes océanographiques et leurs prélèvements à plusieurs niveaux de profondeur.

L'initiative exemplaire de la goélette Tara de réaliser une expédition d'exploration scientifique sur plusieurs années est à poursuivre. Il ne s'agissait pas seulement d'observer les cycles du carbone et de l'oxygène, mais d'étudier la relation entre l'évolution du climat et celle des écosystèmes marins.

Les connaissances scientifiques et résultats de nos observations doivent être accessibles à tous. Pour cela, Océanopolis, centre de culture scientifique et technique dédié aux océans, a mis en place une opération de science participative, « Objectif plancton ». Elle s'appuie sur des protocoles scientifiques de prélèvement de plancton. La démarche a été aussi de regrouper sur un même site des universitaires de l'Institut universitaire européen de la mer de Brest, des chercheurs de la Station biologique de Roscoff et un réseau d'associations citoyennes animé par l'Observatoire du Plancton de Port-Louis.

Ce dernier mène une véritable démarche éco-citoyenne, qui est une opportunité unique d'échantillonner le plancton en différents points de manière simultanée. Une trentaine de prélèvements sont effectués par des pêcheurs/plaisanciers tous les trois mois et sur plusieurs années. Les données obtenues permettent d'avoir une vision globale, spatiale et temporelle de la répartition du plancton qui intéresse tant les scientifiques. Cette initiative, locale dans un premier temps, va se développer autour de la Bretagne et aura des répercussions internationales avec des prélèvements hauturiers.

Aquaculture et concertation

N'oublions pas que de la biodiversité découle la diversité des métiers de la pêche et de l'aquaculture. Les professionnels de la pêche hauturière doivent être attentifs à la qualité des eaux côtières. Les choix d'aménagement du littoral ont des répercussions parfois irréversibles sur l'écologie. Et ce n'est pas l'aquaculture (mis à part la conchyliculture) qui pourra à elle seule pallier la diminution des stocks de poissons.

Mais une aquaculture de soutien à la ressource, par des actions de repeuplement, peut devenir un formidable outil pédagogique. Faire en sorte que les marins se réapproprient ces actions pour que les directives qui leur sont imposées (réduction de l'effort de pêche, quotas, repos biologique, taille des espèces) prennent un sens. Car de la compréhension des mécanismes du vivant dépendra le respect des ressources. Une telle démarche devra être concertée entre pêcheurs, pouvoirs publics et organismes de recherche. Pour que la mer, avec la terre, soit capable d'assurer la production des protéines nécessaires à 8 milliards d'êtres humains.

Patrimoine de l'humanité, gouvernance mondiale

L'avenir des océans n'est pas écrit, il sera ce que l'on en fera. Observer le vivant microscopique, c'est gérer l'aléatoire. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une imagination fertile et des rêves : car c'est d'eux que naissent les grands projets. Les jeunes générations attendent de nous que nous soyons des passeurs du « mieux vivre pour tous ».

Vital pour les populations actuelles et futures, ce « petit peuple de la mer » devrait faire l'objet d'une protection à la mesure de son importance. Le plancton pourrait être déclaré patrimoine de l'humanité et l'on pourrait imaginer une gouvernance mondiale chargée de maintenir une relation optimale entre l'homme et la nature.

Pour ce faire, une prise de conscience citoyenne est indispensable et toutes les initiatives sont les bienvenues pour transmettre ce savoir au plus grand nombre et en particulier aux jeunes. Préserver la diversité du plancton d'aujourd'hui, c'est sauver pour demain la respiration des océans, c'est participer à l'équilibre des échanges gazeux mer-atmosphère, c'est préparer les ressources alimentaires pour l'humanité.

CONCLUSION

Romain TROUBLE et Janique ETIENNE



A l'approche de la COP21, des acteurs de la société civile, de la recherche, du monde économique, dont Tara Expéditions, ont créé la Plateforme Océan et Climat. Le FFEM a rejoint l'initiative en mai 2015. Son objectif est non seulement de participer à la mobilisation générale pour l'adoption d'un accord climat universel, ambitieux et contraignant, mais également de s'assurer que l'océan est pleinement pris en compte dans le futur régime climatique. Nous souhaitons partager ici le plaidoyer de la Plateforme Océan et Climat, appelant l'ensemble des acteurs engagés dans la mise en œuvre du futur régime climatique, à :

1. Produire pour les décideurs un état de la science sur les enjeux et les mesures appropriées concernant les océans et les changements climatiques, notamment par le biais d'un Rapport Spécial du GIEC sur l'Océan.
2. Considérer l'importance d'écosystèmes sains et fonctionnels face au changement climatique, en accélérant la mise en place d'un réseau cohérent et résilient d'aires marines protégées.
3. Reconnaître le rôle des écosystèmes marins et côtiers en tant que puits naturels de carbone (carbone bleu).
4. Développer les Énergies Marines Renouvelables (éolien, hydrolien, énergies marémotrices et houlomotrices), tout en préservant la biodiversité marine.
5. Accompagner la transition énergétique du transport maritime et développer des solutions technologiques innovantes pour des navires plus sûrs et plus respectueux de l'environnement.
6. Soutenir prioritairement les mesures d'adaptation pour les régions les plus vulnérables, en particulier les zones côtières des pays en développement (PED), les territoires et les petits États insulaires.
7. Renforcer le transfert de technologies, vers les pays et les régions océaniques et côtières les plus vulnérables. La coopération internationale doit compter des projets d'adaptation et préservation des écosystèmes marins.
8. Dédier explicitement une part du Fonds Vert aux projets marins et côtiers (protection des mangroves, zones humides et vulnérables dont la capacité de stockage du CO₂ est très importante).
9. Mieux articuler la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les Changements climatiques avec les accords existants relatifs à l'océan, notamment les Objectifs du Développement Durable (ODD).

« Il nous faudra répondre à notre véritable vocation, qui n'est pas de produire et de consommer jusqu'à la fin de nos vies, mais d'aimer, d'admirer et de prendre soin de la vie sous toutes ses formes. »

Pierre Rabhi

LES AUTEURS ET LA RECHERCHE EN FRANCE

Denis Allemand



D. Allemand est physiologiste. Il a obtenu son doctorat en 1986 à l'Université de Montpellier II (France) en sciences pharmacologiques et endocrinologie. Il est professeur de biologie à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, actuellement en disponibilité, et directeur scientifique du Centre Scientifique de Monaco (CSM). Son principal domaine de recherche concerne la physiologie comparée des organismes marins, principalement des coraux, avec un intérêt particulier sur deux fonctions biologiques majeures, la biominéralisation et la symbiose. Il est co-auteur de plus de 130 articles scientifiques et de nombreux chapitres d'ouvrages. Il a supervisé 12 étudiants en doctorat.

Il est membre du Conseil scientifique et technique de la Fondation Prince Albert II, du Conseil scientifique de l'Institut océanographique Fondation Albert I^{er} – Prince de Monaco, du Conseil scientifique de l'École Pratique des Hautes Études (EPHE), du Conseil scientifique de l'IFREMER et du Conseil d'administration de l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer. Il est Chevalier dans les Ordres monégasques de Saint-Charles, de Grimaldi et du Mérite Culturel. Il est également Chevalier de l'Ordre du Mérite Maritime français et Officier dans l'ordre des Palmes académique.

Le Centre Scientifique de Monaco (CSM) est un organisme public monégasque dédié historiquement à la recherche dans le domaine marin, domaine dans lequel il développe des études du gène à l'écosystème à travers deux équipes de recherche. En 2009, le CSM s'est ouvert à l'économie environnementale afin d'étudier les impacts socio-économiques des changements climatiques en milieu marin. En 2012, le CSM a signé une convention avec le CNRS et l'Université de Strasbourg pour la création d'un Laboratoire International Associé, dédié à l'étude de l'impact des changements climatiques sur les populations de manchots. En 2013, il a intégré une composante en recherche biomédicale qui comprend aujourd'hui une agence de financement de la recherche clinique en Princi-pauté et quatre équipes de recherche spécialisées en Cancer et angiogenèse, Biothérapies et myopathies et Microbiome digestif. Il héberge un observatoire international sur la Drépanocytose (Monacord).

Pour plus de détails consulter www.centrescientifique.mc.

Luc Beaufort



Luc Beaufort est directeur de recherche au CNRS. Il est paléontologue, écologue, et océanographe, spécialiste du nannoplancton. Ses études sur les coccolithophores qu'ils soient vivants ou fossiles portent sur le lien existant entre ces phytoplanctons, l'océan (ex. acidification de l'océan) et le climat (ex. intensité des moussons ou d'El Nino). Il a publié une centaine d'articles dont plusieurs dans Nature et Science. Il dirige au CEREGE, l'équipe « Bioindicateurs et traceurs des paléoenvironnements » composée d'une vingtaine de chercheurs spécialistes des bio-indicateurs présents dans les archives sédimentaires océaniques et continentales pour restituer l'évolution dans le temps des paramètres environnementaux.

Le CEREGE, Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement basé à Aix en Provence et Marseille est un laboratoire spécialisé dans la recherche environnementale composé de plus de 120 Chercheurs et Enseignants-Chercheurs appartenant aux CNRS, l'IRD, l'Université Aix Marseille et au Collège de France. Avec ces équipements performants (certains nationaux) le CEREGE est un centre internationalement reconnu en géologie de l'environnement. Ses principaux thèmes et objets d'études sont la Planétologie, la Géodynamique terrestre, les études climatiques et environnementale (ex. dynamique des écosystèmes), des réservoirs sédimentaires et hydrologiques; le fonctionnement des sols et l'impact des nanomatériaux, des déchets et des polluants sur l'environnement.

Grégory Beaugrand



Grégory Beaugrand est directeur de recherche au laboratoire d'océanologie et de géosciences (LOG). Il travaille sur les implications du changement climatique anthropique et la variabilité climatique naturelle sur la biodiversité marine et les services écosystémiques. Il développe une théorie macroécologique pour comprendre comment la vie s'organise en milieux terrestre et marin.

Le LOG est une unité de recherche qui associe le CNRS, l'Université de Lille, et l'Université du Littoral Côte d'Opale. Ce laboratoire associe chercheurs et enseignant-chercheurs en biologie, écologie, physique, géologie et géographie. Grégory Beaugrand anime l'équipe Ecosystèmes, Biodiversité et Changements globaux (ECOGLOB). Cette équipe travaille sur les effets des changements globaux sur les écosystèmes et la biodiversité à échelles spatio-temporels multiples et à tous niveaux organisationnels depuis les espèces jusqu'aux grands biomes marins et continentaux.

Isabelle Biegala



Isabelle Biegala est chargée de recherche à l'IRD depuis 2004 et travaille dans l'unité mixte de recherche (UMR) du M.I.O (Institut Méditerranéen d'Océanologie) sur le campus d'Aix-Marseille-Université. Spécialiste du plancton depuis 1994 elle a étudié successivement le zooplancton, le phytoplancton et le bactérioplancton. Elle s'intéresse plus spécifiquement à la diversité et au rôle fonctionnel des cyanobactéries diazotrophes (fixatrices du di-azote atmosphérique) dans la productivité des écosystèmes oligotrophes de Méditerranée et du Sud-Ouest Pacifique.

En 2012 elle crée, en collaboration avec d'autres unités le programme d'observation SPOT (South Pacific Ocean Time Series), au large de la Nouvelle-Calédonie. Celui-ci permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres physiques, chimiques et biologiques de la colonne d'eau qui impacte les îles Loyautés, la mer de corail et les eaux profondes du bassin Fidjien. Le fonctionnement de l'écosystème à SPOT est étudié en comparaison avec ceux de Méditerranée Nord et Sud grâce à des collaborations avec les chercheurs Tunisiens de l'INSTM (Institut national des Sciences et Techniques de la Mer).

En plus de ces thématiques de recherche Isabelle Biegala est responsable de la Plateforme de Microscopie et d'Imagerie du M.I.O et développe de nouveaux outils, techniques et instrumentations de terrain grâce à des compétences en biochimie, en biologie moléculaire et en microscopie. Le développement de ces techniques a pour but d'acquies plus rapidement et précisément les caractéristiques biologiques de nos écosystèmes en lien avec les changements globaux.

Gilles Boeuf



Gilles Boeuf est professeur à l'université Pierre et Marie Curie (UPMC) et effectue ses travaux de recherche au sein de l'unité « Biologie intégrative des organismes marins » au Laboratoire Arago (Observatoire océanologique) à Banyuls-sur-Mer, dans les Pyrénées Orientales. Il est un spécialiste de physiologie environnementale et de biodiversité, marine et terrestre. Il a également beaucoup travaillé sur les bases biologiques de l'aquaculture. Après avoir passé vingt ans à l'IFREMER, il a été directeur durant six ans de l'Observatoire océanologique de Banyuls, puis pendant quatre ans de l'unité CNRS/UPMC Modèles en biologie cellulaire et évolutive. Il est membre de nombreux conseils scientifiques. Président du Muséum national d'Histoire naturelle de 2009 à 2015, il a été élu récemment professeur invité au Collège de France, à la chaire « Développement durable – Environnement, Énergie et Société ». Depuis Juillet 2015, il a été nommé conseiller scientifique pour l'environnement, la biodiversité et le climat au cabinet de Ségolène Royal, ministre de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie. Il est l'auteur de plus de 400 articles scientifiques, de vulgarisation scientifique, de chapitres de livres, de communications. Il travaille inlassablement à communiquer sur la biodiversité, son évolution, sur l'histoire de "l'humain dans la biodiversité" et révèle ce qui attend le monde, si les hommes ne changent pas leur comportement.

Charles François Boudouresque



Le MIO (Mediterranean Institute of Oceanography)

Le MIO, créé en 2012, résulte de la fusion de plusieurs laboratoires préexistants, appartenant aux universités d'Aix-Marseille et de Toulon. Il est centré sur un ensemble de bâtiments récemment inaugurés sur le campus de Luminy, entre Marseille et Cassis, face au décor exceptionnel du tout nouveau Parc national des Calanques. Sa taille, ses équipements, la diversité et la complémentarité des compétences qui y sont réunies, en font désormais l'un des grands acteurs de l'océanographie planétaire. Le MIO réunit des enseignants-chercheurs universitaires, qui enseignent en particulier en biologie, écologie et océanographie, des chercheurs du CNRS et des chercheurs de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Les chercheurs du MIO sont impliqués dans des programmes qui concernent les 5 continents et les mers et océans qui les entourent. Ils se regroupent en 5 équipes (océanographie physique, chimie, microbiologie, cycles biogéochimiques, écologie marine et biodiversité), avec des axes transversaux et des interactions fortes entre équipes.

Chris Bowler



Né en Grande Bretagne, Chris Bowler a été initialement formé en microbiologie et il s'est spécialisé par la suite en biologie moléculaire végétale pendant son doctorat et post-doctorat à l'Université de Gand en Belgique et à la Rockefeller University de New York. Bien qu'étant très productif dans ce domaine, il a décidé après son recrutement à la Stazione Zoologica (Naples, Italie) en 1994 de lever un verrou important et de répondre à un besoin réel : le manque d'outils moléculaires chez les eucaryotes microbiens marins.

Sa venue à l'École Normale Supérieure en 2002 a coïncidé avec l'entrée des diatomées dans l'ère de la génomique et il a contribué par le séquençage de différentes espèces et à la découverte de plusieurs processus physiologiques fondamentale à travers les approches de biologie moléculaire et cellulaire. L'activité de son laboratoire est actuellement focalisée sur la découverte des processus clés pour le succès des diatomées dans l'environnement facilités particulièrement par l'analyse des données du projet Tara Oceans. Ses contributions à la recherche ont été reconnues par la médaille d'argent du CNRS en 2010 et le grand prix scientifique de la Fondation Louis D à l'Institut de France en 2015.

Bowler a été le pionnier dans le développement d'outils moléculaires et génomiques chez les diatomées, un groupe d'eucaryotes photosynthétiques jugé responsable de l'équivalent en production primaire de toutes les forêts tropicales sur terre.

Dans son laboratoire à l'École Normale Supérieure, Chris Bowler décortique les génomes des diatomées et les processus cellulaires physiologiques qui les distinguent par rapport aux autres organismes mieux étudiés.

Janique Etienne



Docteur en sciences et techniques de l'environnement, Janique ETIENNE a intégré l'Agence Française de développement (AFD) en 1999. Depuis 2011, elle est chargée des projets au sein du Secrétariat du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) en particulier dans le domaine de la gestion côtière intégrée et de la Haute-mer. Elle contribue à l'instruction et à la mise en œuvre de projets, dont certains comportent une composante recherche fondamentale et appliquée au service d'enjeux de gouvernance à l'échelle locale, régionale, au travers des conventions de mers régionales, et internationale.

Catherine Gabrié



Catherine Gabrié, docteur en océanographie, est consultante en environnement marin et littoral. Depuis 1999, elle assure l'assistance technique de l'Initiative française pour les récifs coralliens (IFRECOR) auprès des ministères en charge de l'environnement et de l'outre-mer. Elle travaille sur des projets de protection de la biodiversité marine et littorale dans de nombreuses régions du monde : Pacifique, Océan indien, Afrique de l'Est, de l'Ouest. Pour le FFEM et l'Agence française de développement (AFD), elle a capitalisé les leçons tirées de l'ensemble du portefeuille de projets relatifs à la conservation de la biodiversité marine en milieu corallien et aux aires marines protégées, puis a assuré l'évaluation et la capitalisation du programme de protection des récifs coralliens du Pacifique sud (CRISP). Pour le FFEM, elle a développé plusieurs projets régionaux dans l'océan indien : réseau d'AMP, expériences de GIZC et protection des monts sous-marins au-delà des zones de juridiction nationales. Pour l'UNESCO, elle a participé au travail d'identification des sites marins d'intérêt potentiel de l'océan indien à inscrire au Patrimoine Mondial. Elle a rédigé ou coordonné plusieurs ouvrages de connaissances générales de l'outre-mer : l'État d'environnement des territoires français du Pacifique sud ; l'État des récifs coralliens d'outre-mer ; les aires marines protégées de l'outre-mer tropical ; les mangroves de l'outre-mer ; les herbiers de l'outre-mer...

Jean Pierre Gattuso



Jean-Pierre Gattuso, directeur de recherche au CNRS, travaille laboratoire d'océanographie de Villefranche (Université Pierre et Marie Curie-Paris 6). Il est également chercheur associé à l'Institut du développement durable et des relations internationales. Ses recherches concernent les cycles du carbone et des carbonates dans les écosystèmes côtiers. Il travaille sur la réponse des organismes et des écosystèmes marins à l'acidification des océans depuis 1995. Il a coordonné l'*European Project on Ocean Acidification* dont l'objectif était de déterminer les conséquences biologiques, écologiques, biogéochimiques et sociétales de l'acidification des océans. Jean-Pierre Gattuso continue ses recherches sur les effets du réchauffement et de l'acidification des océans sur les écosystèmes marins et les services écosystémiques.

Jean-Pierre Gattuso a fondé et présidé le groupe de travail SOLAS-IMBER sur l'acidification des océans et a conduit le lancement du Centre international de coordination des recherches sur l'acidification des océans basé à Monaco. Il a co-édité le premier ouvrage sur cette question (Oxford University Press), fondé et présidé la Division *Biogéosciences* de l'Union européenne de géosciences (EGU) et lancé comme éditeur-en-chef le périodique *Biogéosciences*. Jean-Pierre Gattuso a reçu la médaille Vladimir Vernadsky de l'EGU en 2012 et la médaille Blaise Pascal de l'Académie européenne des sciences en 2014. Il est membre élu de cette académie.

Michel Kulbicki



Michel Kulbicki fait partie de l'équipe CHOREUS de l'IRD (voir C. Payri). Son principal centre d'intérêt est actuellement la macro-écologie et la biogéographie des poissons des récifs coralliens et espèces des milieux limitrophes. Ces travaux tentent également d'aborder les problèmes de gestion à grande échelle que posent ces espèces avec une prise en compte croissante des perturbations que pourraient engendrer le réchauffement global, l'augmentation de la pêche et l'augmentation du niveau de vie. Pour comprendre certains aspects de ces changements, il est également engagé sur des recherches portant sur les espèces invasives en Méditerranée.

Alexandre K. Magnan



L'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri, Paris) est une fondation de recherche reconnue d'utilité publique, qui a pour objectif d'élaborer et de partager des clés d'analyse et de compréhension des enjeux stratégiques du développement durable dans une perspective mondiale. L'Iddri accompagne les différents acteurs dans la réflexion sur la gouvernance mondiale des grands problèmes collectifs que sont l'atténuation du et l'adaptation au changement climatique, la protection de la biodiversité, la sécurité alimentaire, l'urbanisation, les formes de nouvelle prospérité, et les problématiques liées à l'océan. Par ce regard croisé, l'Iddri pilote des réflexions sur les trajectoires de développement.

Cyril Marchand



Le groupe mangrove de l'UMR IMPMC (Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie) travaille à la compréhension et la quantification des processus liant la dynamique du contenu organique des sédiments de mangrove et celle des éléments métalliques, ainsi que la modélisation du rôle de la mangrove dans les processus de transfert océan-continent le long des littoraux tropicaux. 3 axes de recherche sont développés prioritairement : i) l'influence de la crevetticulture sur le fonctionnement écologique de la mangrove, ii) le devenir des métaux lourds au sein des sédiments de mangrove, iii) le bilan carbone des mangroves. Parallèlement, ce groupe développe un réseau d'observation des mangroves dans la zone Indo-Pacifique suivant un gradient latitudinale climatique et de biodiversité afin de mieux suivre leurs évolutions liées aux changements climatiques.

Franck Mazeas



Franck Mazeas travaille à la DEAL Guadeloupe, en charge de la biodiversité marine (AMP, programme IFRECOR, espèces exotiques envahissantes, avis Etat sur dossiers réglementaires). Au titre du changement climatique et dans le cadre du programme IFRECOR (Initiative française sur les récifs coralliens), il est responsable des programmes de surveillance de l'état de santé des récifs coralliens depuis 2009. Il assure également la coordination des actions de prévention et de lutte contre les invasions de sargasses et du poisson-lion. L'observatoire de l'énergie et du climat de la Guadeloupe a été créé en décembre 2013. Il est issu de la volonté commune de la DEAL, l'ADEME, la Région Guadeloupe, Météo-France et EDF, de se doter d'un instrument spécifique de suivi et d'évaluation des actions menées en Guadeloupe (i) en matière de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables, (ii) en faveur de l'atténuation des changements climatiques, (iii) en matière d'adaptation aux changements climatiques.

Pierre Mollo



Après quarante ans au service du plancton et de la ressource marine, cet enseignant-chercheur est devenu un expert en la matière. Aujourd'hui, il utilise tout son temps à transmettre son expérience au plus grand nombre et à tisser des liens entre le monde des professionnels de la mer et celui de la connaissance scientifique. Il développe des coopérations internationales (Europe, Asie, Afrique, Amérique du Sud ...) et s'engage, avec des associations bretonnes d'agriculteurs, de pêcheurs, de conchyliculteurs, dans la gestion du littoral et la préservation du plancton. Il participe à des conférences dans le monde entier, réalise films et vidéos, rédige de nombreux articles, anime des forums, écrit des livres et, en partenariat avec Océanopolis et la Fondation pour le progrès de l'homme (FPH), a créé un site Internet (plancton-du-monde.org), dans le but d'offrir à tout citoyen son savoir sur le plancton et le milieu marin.

Claude Payri



Claude Payri dirige l'unité mixte de recherche ENTROPIE issue du rapprochement des unités CoReUs (IRD) et ECOMAR (université de La Réunion et CNRS). ENTROPIE regroupe des écologues, des écophysologistes et des généticiens marins ainsi que des spécialistes de la télédétection et du traitement du signal, autour d'un projet commun dont l'objectif vise à mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes marins et insulaires de l'Indo-Pacifique tropical dans le contexte du changement global afin de proposer des stratégies de conservation, de valorisation et de gestion durable. L'originalité d'ENTROPIE est l'approche intégrative à différentes échelles spatio-temporelles des processus évolutifs et de résilience des écosystèmes récifaux et hauturiers à travers les interactions de l'homme avec les ressources et le milieu.

Christine Pergent-Martini



L'équipe « Ecosystèmes littoraux » à laquelle Christine Pergent-Martini et Gérard Pergent appartiennent, œuvre depuis 1993 à mieux cerner le rôle et le fonctionnement des herbiers marins. Depuis 2014, l'équipe anime, avec le soutien de la Collectivité Territoriale de Corse, l'action « Changements globaux en milieu insulaire » (CHANGE), au sein de la Fédération de Recherche « Environnement et Société » qui regroupe des chercheurs, issus des deux UMR de l'Université de Corse et de deux laboratoires INRA. L'équipe met en œuvre le programme « Résilience et contribution des écosystèmes littoraux à l'atténuation des changements climatiques », qui vise à appréhender si les magnoliophytes marines peuvent enregistrer les changements globaux et contribuer à en atténuer les effets. Parmi les approches développées (caractérisation, fonctionnement et analyse des réponses aux modifications environnementales), les recherches engagées visent à mieux connaître le rôle des écosystèmes benthiques côtiers dans la fixation du carbone et à évaluer les stocks de carbone bleu séquestrés, ainsi qu'à proposer un modèle d'évaluation des fonctionnalités des herbiers de magnoliophytes marines et des mesures de conservations adaptées (aires protégées).

Christine Pergent-Martini est également membre du Comité Scientifique du FFEM.

Gérard Pergent



Serge Planes



Le Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement (CRIOBE - USR 3278 EPHE-CNRS-UPVD) focalise son activité sur l'étude des récifs coralliens avec comme focus central l'écologie des récifs mais aussi des approches complémentaires associant les sciences sociales, la chimie et la géographie. Le CRIOBE est implanté sur le campus de l'Université de Perpignan en métropole et sur l'île de Moorea en Polynésie française. Cette double implantation permet de mieux conjuguer collaboration nationale et internationale et recherches de terrain. L'implantation stable sur Moorea depuis 1971 a permis de suivre l'évolution du récifs depuis les années 1975 et de proposer à présent les séries temporelles parmi les plus longues au monde pour appréhender l'évolution à long termes des récifs coralliens face aux perturbations globales ou locales. Le CRIOBE est porteur du laboratoire d'excellence (LABEX) CORAIL qui regroupe les principaux organismes français impliqués dans la recherche française sur les récifs coralliens.

Philippe Potin



Philippe Potin est chercheur CNRS (Directeur de Recherche ?) affecté à la Station Biologique de Roscoff. Au sein de l'unité LBI2M, Laboratoire de Biologie Intégrative des Modèles Marins (UMR 8227 CNRS-UPMC), ses activités de recherche sont axées sur la biochimie et la physiologie cellulaire et moléculaire des mécanismes de l'immunité innée chez les grandes algues marines. Plus particulièrement la signalisation et l'activation des métabolismes des oxylipines, des composés phénoliques et de l'iode. Son équipe a collaboré avec des bio-géochimistes anglais pour comprendre l'impact de l'iode émis par les algues sur le climat côtier et le cycle de l'iode sur Terre. Il coordonne aussi de 2011 à 2020, le projet d'Investissements d'Avenir, IDEALG, dans le cadre de l'appel d'offres Biotechnologies-Bioressources qui rassemble plus de 130 acteurs du secteur public et privé pour capitaliser sur les progrès de la génomique et de la génétique des algues et de leurs micro-organismes associés pour développer leur aquaculture et les biotechnologies permettant d'optimiser leurs utilisations.

La Station Biologique de Roscoff (SBR) est un centre de recherche et d'enseignement en biologie marine et écologie marine. Fondée en 1872, elle fait partie des 3 stations marines de l'Université Pierre-et-Marie-Curie (UPMC) et du CNRS qui forme le nœud français de la future infrastructure européenne de biologie marine (EMBR). Ses recherches s'étendent de la zone côtière, à l'océan et aux grands fonds océaniques avec des approches du gène à l'écosystème. La SBR a largement participé dans l'expédition TARA-Océans dont l'exploitation se poursuit dans le projet Océanomics (PIA Biotechnologies-Bioressources 2011-2019).

Christian Sardet



Christian Sardet, directeur de recherche émérite au CNRS, travaille à la Station Marine (OOV) de Villefranche sur Mer où il a fondé le Laboratoire de Biologie Cellulaire et Développement et dirigé l'équipe BioMarCell dont les activités concernent le fécondation et le développement des embryons.

Il est l'auteur d'une centaine de publications sur la biologie des cellules et des embryons et a reçu le Grand Prix des Sciences de la Mer (Académie des Sciences 2013). Il est également l'auteur de plusieurs films, dessins animés et DVDs primés, et a reçu le prix Européen pour la communication en sciences du vivant (EMBO 2007). Christian Sardet est l'un des co-fondateur et de coordinateur de l'Expédition Tara Oceans consacrée à l'étude globale du plancton, Dans ce cadre Christian Sardet a initié le projet "Chroniques du Plancton : <http://www.planktonchronicles.org>" qui marie art et sciences dans le but de faire partager la beauté et la diversité du plancton. Il est l'auteur d'un livre; "Plancton aux origines du vivant" (Ulmer 2013), également publié en Japonais (Kawade Shobo 2014) et en Anglais (Univ. Chicago Press 2015).

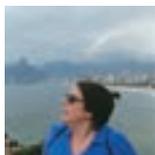
Valérie Stiger-Pouvreau



Valérie Stiger-Pouvreau est docteur en Ecologie marine. Elle a rejoint l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) en 2000, et le LEMAR en 2012. Au sein du LEMAR, elle a développé un axe de recherche intitulé « Ecologie chimique des végétaux marins », dans lequel sont étudiées les interactions entre espèces végétales (microalgues, macroalgues, plantes halophiles), mais également l'influence des variations environnementales sur ces interactions, médiées par des molécules dans toute leur diversité et complexité.

Le LEMAR, porté par 4 tutelles (CNRS, UBO, IRD, IFREMER) est une unité mixte de recherche (UMR 6539) regroupant des biologistes, chimistes et physiciens qui ont pour mission de comprendre et modéliser les systèmes marins au sein de la biosphère, définir les caractéristiques du milieu et des organismes, et préciser leurs interactions. Le laboratoire est rattaché à l'Institut Ecologie et Environnement (INEE) du CNRS. Il est par ailleurs rattaché au Département des Ressources Vivantes (DRV) de l'IRD et de l'Ifremer. Le LEMAR est situé à l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), composante Mer de l'UBO et devenu Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) en 2005. L'UMR 6539 est en particulier responsable du suivi de plusieurs séries d'observation du domaine côtier, que ce soit dans le domaine pélagique ou benthique.

Myriam Valero



Myriam Valero, Directrice de Recherche au CNRS a fondé en Janvier 2014, le laboratoire de recherche international (UMI 3614) implanté sur trois sites : Roscoff (France), Santiago et Valdivia (Chili) et impliquant des chercheurs du CNRS, de l'Université Pierre et Marie Curie, de la « Pontificia Universidad Católica de Chile » et de la « Universidad Austral de Chile ». Les côtes bretonnes et chiliennes constituent des écosystèmes côtiers rocheux remarquables caractérisés par une forte ressource algale dont les enjeux écologiques et économiques sont importants. Même si dans ces deux régions, les pêcheries de macroalgues ont une histoire ancienne, ces ressources restent largement inexplorées. Ces écosystèmes qui sont soumis au changement climatique et aux activités anthropiques s'en trouvent menacés. L'objectif de l'UMI est de documenter la biodiversité des micro et macro algues marines et de s'intéresser à la généralité des processus évolutifs en comparant des espèces dans des écosystèmes similaires mais ayant des histoires évolutives différentes. Il s'agit de comprendre les contraintes écologiques et évolutives de leur adaptation, à travers leurs modes de reproduction, leur structure génétique, les processus de spéciation tout en tenant compte de l'influence de l'environnement et des activités humaines, notamment dans le contexte de la domestication des algues et du changement global.

Site web UMI : <http://www.sb-roscoff.fr/fr/umi-biologie-evolutive-et-ecologie-des-algues>

Bruno Voituriez



Océanographe docteur ès Sciences, Bruno Voituriez est l'ancien responsable des programmes d'Océanographie Physique et Spatiale de l'Ifremer. Ancien Président du Comité National Français pour la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO. Ses domaines de recherche se sont concentrés particulièrement sur les Etudes des mécanismes physiques contrôlant la production biologique des océans tropicaux et le rôle des océans dans la variabilité climatique.

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

- Duarte CM, J. J. Middelburg, N. Caraco. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. Biogeosciences, European Geosciences Union (EGU), 2005, 2 (1), pp.1-8.
- Laffoley, D., Grimsditch, G. (eds). 2009. The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland. 53 pp.
- Laffoley, D., Baxter, J. M., Thevenon, F. and Oliver, J. (editors). 2014. The Significance and Management of Natural Carbon Stores in the Open Ocean. Full report. Gland, Switzerland: IUCN. 124 pp.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds). 2009. Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Nourry A, Mollo, 2013. Le manuel du plancton. Editions Charles Léopold Mayer 2013 www.eclm.fr
- Sardet C., 2013. Plancton : Aux origines du vivant. Editions Ulmer : 216p.

I. BIEGALA

- Awramik, S.M., J. Sprinkle. 1999. Proterozoic stromatolites: the first marine evolutionary biota. Historical Biology. Volume 13. p. 241-253
- Cheng, 2006. The emergence of cells during the origin of life, Science 314 : 1558-1559.
- Goldblatt et al. 2006. Bistability of atmospheric oxygen and Great Oxidation, Nature 443 : 683-686, doi :10.1038/nature05169
- Hüglér and Sievert, 2011. Beyond the Calvin cycle : autotrophic carbon fixation in the ocean. Ann. Rev. Mar. Sci. 3 :261-289.
- J. Raven, 2009 Contributions of anoxygenic and oxygenic phototrophy and chemolithotrophy to carbon and oxygen fluxes in aquatic environments. Aquat. Microb. Ecol. 56 : 177-192.
- L. Sagan, 1967. On the origin of mitosing cells J. theoret. Biol. 14 : 225-274.
- Spang et al. 2015. Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes, Nature doi:10.1038/nature14447.

C. SARDET

- Colomban de Vargas et al. (2015) Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean, Science Vol. 348 no. 6237
- Sardet C, (2013) Plancton, aux origines du vivant, ULMER, Paris
- Société Japonaise de Plancton / traduit par F Not (2015) Le Plancton, Editions de la Station Biologique de Roscoff
- Pierre Mollo, Maëlle Thomas-Bourgneuf (2009) L'enjeu Plancton: L'écologie de l'Invisible. Editions Charles Léopold Meyer
- Anne Noury et Pierre Mollo " Le manuel du plancton " Editions Charles Léopold Mayer 2013 www.eclm.fr
- Sardet C. site interactif Chroniques du Plancton: <http://www.planktonchronicles.org>

CHRIS BOWLER

- Bowler, C., Vardi, A., Allen AE. 2010. Oceanographic and biogeochemical insights from diatom genomes. Ann. Rev. Mar. Sci. 2, 333-365.
- Chepurnov, V.A., Mann, D.G., Sabbe, K., Vyverman, W. 2004. Experimental studies on sexual reproduction in diatoms. Int. Rev. Cytol. 237, 91-154.
- P. G. Falkowski, M. E. Katz, A. J. Milligan et al., Science 309, 2202 (2005).
- Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T., Falkowski, P. 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science. 281, 237-240.
- Fields, M.W., Hise, A., Lohman, E.J., Bell, T., Gardner, R.D., Corredor, L., Moll, K., Peyton, B.M., Characklis, G.W., Gerlach, R. 2014. Sources and resources: importance of nutrients, resource allocation, and ecology in microalgal cultivation for lipid accumulation. Appl. Microbiol. Biotechnol. 98: 4805-4816.
- Gordon, R., Losic, D., Tiffany, M.A., Nagy, S.S., Sterrenburg, F.A. 2009. The Glass Menagerie: diatoms for novel applications in nanotechnology. Trends Biotechnol. 27: 116-127.
- Kröger, N., Poulsen, N. 2008. Diatoms-from cell wall biogenesis to nanotechnology. Annu. Rev. Genet. 42, 83-107.
- Lewis, W.M. Jr. 1984. The diatom sex clock and its evolutionary significance. Am. Naturalist.123, 73-80.
- Moustafa, A., Beszteri, B., Maier, U.G., Bowler, C., Valentin, K., Bhattacharya, D. 2009. Genomic footprints of a cryptic plastid endosymbiosis in diatoms. Science. 324, 1724-1726.
- Nassif, N., Livage, J. 2010. From diatoms to silica-based biohybrids. 2010. Chem Soc Rev. 40, 849-859.
- Tréguer P.J., De La Rocha C.L. 2013. The world ocean silica cycle. Ann. Rev. Mar. Sci. 5, 477-501.

C. ET G. PERGENT

- Bjork, M., McLeod, E., Short, F., Beer, S., 2008. Managing seagrasses for resilience to climate change. World Conservation Union (IUCN), Gland.
- Boudouresque, C.F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., Tunesi, L. 2012. Protection and conservation of Posidonia oceanica meadows. RAMOGE.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van der Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.
- Fourqurean, J.W., Duarte, C.M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M.A., Apostolaki, E.T., Kendrick, G.A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K.J., Serrano, O., 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature geoscience*.
- Laffoley, D., Grimsditch, G., 2009. The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G., 2009. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon : a rapid response assessment. GRID-Arendal, Arendal, [Norway].
- Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C.N., Boudouresque, C.F., Buia, M.C., Calvo, S., Clabaut, P., Harmelin-Vivien, M., Mateo, M.Á., Montefalcone, L. Morri, C., Orfanidis, S., Pergent-Martini, C., Semroud, R., Serrano, Thibaut, T., Tomasello, A., Verlaque, M., 2014. Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Mediterranean Marine Science* 15.
- Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C.N., Boudouresque, C.F., Buia, M.C., Clabaut, P., Harmelin-Vivien, M., Mateo, M.A., Montefalcone, M., Morri, C., Orfanidis, S., Pergent-Martini, C., Semroud, R., Serrano, O., Verlaque, M., 2012. Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques. UICN, Gland, Suisse & Malaga, Espagne.

C. MARCHAND

- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-Monroy, V. H., Smith III, T.J., and Twilley, R. R. 2008. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycling* 22, GB 2013
- Cherry JA, McKee KL, Grace JB. Elevated CO2 enhances biological contributions to elevation change in coastal wetlands by offsetting stressors associated with sea-level rise. *J Ecol.* 2009;97:67
- Duke, N. C., Meynecke, J.-O., Dittmann, S., M. Ellison, A., Anger, K., Berger U., Cannicci, S., Diele, K., Ewel, K. C., Field, C. D., Koedam, N., Lee, S. Y., Marchand C., Nordhaus, I., Smith III, T. J., Dahdouh-Guebas, F. 2007. A world without mangroves? *Science* 317
- McKee KL, Rooth JE. Where temperate meets tropical: multi-factorial effects of elevated CO₂, nitrogen enrichment, and competition on a mangrove-salt marsh community. *Global Change Biol.* 2008;14:971
- McKee KL, Rogers K, Saintilan N. Response of salt marsh and mangrove wetlands to changes in atmospheric CO₂ climate, and sea level. In: Middleton BA, editor. *Global change and the function and distribution of wetlands.* Dordrecht: Springer; 2012. p.63

C. PAYRI

- Basso D., 2012. Carbonate production by calcareous red algae and global change. *Geodiversitas* • 2012 • 34 (1)
- Chisholm, J. R. M. 2000. Calcification by crustose coralline algae on the northern Great Barrier Reef, Australia. *Limnol. Oceanogr.* 45: 1476–1484
- Chung et al. 2011. Using marine macroalgae for carbon sequestration: a critical appraisal. *Journal of Applied Phycology* vol 23 n° 5 : 877-886
- Coyle TA & Graham M.H. (2012). Effects of climate change on global seaweed communities. *J.phycol.*, 48, 1064-1078
- Duarte C.M. and Cebrian J. 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnol. Oceanogr.* 41 (8) 1758-1766.
- Duarte CM and Chiscano CL. 1999. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany* 65, 159–174.
- Duarte CM, J. J. Middelburg, N. Caraco. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences, European Geosciences Union (EGU)*, 2005, 2 (1), pp.1-8.
- Flisher K. & Martone P. T. 2014 Field Study of Growth and Calcification Rates of Three Species of Articulated Coralline Algae in British Columbia, Canada *Biol. Bull.* 226: 121–130. (April 2014)
- Freiwald, A., and R. Henrich. 1994. Reefal coralline algal build-ups within the Arctic Circle: morphology and sedimentary dynamics under extreme environmental seasonality. *Sedimentology* 41: 963–984
- Gao and McKinley, 1994. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation : a review. *Journal of applied Phycology* 6 : 45-60 : 45-60
- Graham M.H., Kinla B.P., Druehl L.D., Garske L.E. & Banks S. 2007. Deep-water refugia as potential hotspots of tropical marine diversity and productivity. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 104:16576-80
- Harley C.D.G., Anderson K.M., Demes K.W., Jorve J.P., Kordas L., Coyle TA & Graham M.H. 2012. Effects of climate change on global seaweed communities. *J.Phycol.*, 48, 5: 1064-1078.
- Laffoley D. d'A. and Grimsditch G. (eds), 2009. The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland. 53pp
- Muraoka D., 2004. Seaweed resources as a source of carbon fixation. *Bull. Fish. Res. Agen. Supplement N°1*: 59-63
- Reed D. C and Brzezinski M.A., 2009. Kelp forests in Laffoley D. d'A. and Grimsditch G. (eds), *The management of natural coastal carbon sinks.* IUCN, Gland, Switzerland.:31-37
- Schafer, P., H. Fortunato, B. Bader, V. Liebetrau, T. Bauch, and J. J. G. Reijmer. 2011. Growth rates and carbonate production by coralline red algae in upwelling and non-upwelling settings along the Pacific coast of Panama. *Palaios* 26: 420–432
- Smith, S. V. 1972. Production of calcium carbonate on the mainland shelf of southern California. *Limnol. Oceanogr.* 17:28–41
- Steneck R.S., Graham M.H., Bourque B.J., Corbett D., Erlandson J.M., Estes J.A. & Tegner M.J. 2002. Kelp forest ecosystem: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation*, 29(4): 436-459.
- Suzuki Y (ed.), 1997. *Marine biota and global carbon cycling*, University of Tokyo press, Tokyo, 208pp.

P. POTIN ET M. VALERO

- Huang R.-J., U. R. Thorenz, M. Kundel, D. S. Venables, D. Ceburnis, K. F. Ho, J. Chen, A. L. Vogel, F. C. Küpper, P. P. A. Smyth, U. Nitschke, D. B. Stengel, H. Berresheim, C. D. O'Dowd, and T. Hoffmann 2013: The seaweeds *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum* are significant contributors to coastal iodine emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5255–5264,
- Küpper, F. C., Carpenter, L. J., McFiggans, G., Palmer, C. J., Waite, T., Woitsch, S., Boneberg, E.-M., Weiller, M., Potin, P., Butler, A., Luther III, G. W., Kroneck, P., Meyer-Klaucke, W., and Feiters, M. C. 2008.: Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105: 6954–6958,
- Leblanc C. & Potin P. (2010). L'air iodé du bord de mer : de la défense des algues à la formation des nuages. *Biofutur*, 308, 49-51.
- McFiggans, G., Bale, C. S. E., Ball, S. M., et al.: 2010: Iodine-mediated coastal particle formation: an overview of the Reactive Halogens in the Marine Boundary Layer (RHAMBLe) Roscoff coastal study, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2975–2999,
- Ormeno E & Potin P. 2012. Composés volatils de défense et formation de nuages. In : *L'écologie chimique: le langage de la nature.* Ouvrage collectif INEE CNRS, Ed. Cherche Midi, Paris, p.114
- Verhaeghe, E. F., Fraysse, A., Guerquin-Kern, J.-L., Wu, T.-D., Devès, G., Mioskowski, C., Leblanc, C., Ortega, R., Ambroise, Y., and Potin, P. 2008.: Microchemical imaging of iodine distribution in the brown alga *Laminaria digitata* suggests a new mechanism for its accumulation, *J. Biol. Inorg. Chem.*, 13, 257–269
- Arkema KA, Guannel G, Verutes G, Wood SA, Guerry A, Ruckelshaus M, Kareiva P, Lacayo M, Silver JM (2013) People and property shielded from sea level rise and storms by coastal habitats *Nature Climate Change* <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1944>
- Erlandson JM, Graham MH, Bourque BJ, et al. (2007) The kelp highway hypothesis: marine ecology, the coastal migration theory, and the peopling of the Americas. *J. Isl. Coast. Arch.* 2: 161-174.
- Raybaud V, Beaugrand G, Goberville E, Delebecq G, Destombe C, Valero M, et al (2013) Decline in kelp in west Europe and climate. *PLoS ONE*;8:e66044.
- Smale DA, Burrows MT, Moore P, O'Connor N, Hawkins SJ (2013) Threats and knowledge gaps for ecosystem services provided by kelp forests: a northeast Atlantic perspective. *Ecology and Evolution* 3: 4016-4038.
- Steneck RS, Graham MH, Bourque BJ, et al. (2002) Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation* 29 : 436-459.

LES MAMMIFÈRES MARINS

- Trish J. Lavery et al. Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean (2015) *Proc. R. Soc. B* (2010) 277, 3527–3531 doi:10.1098/rspb.2010.0863
- Roman J, McCarthy JJ (2010) The Whale Pump: Marine Mammals Enhance Primary Productivity in a Coastal Basin. *PLoS ONE* 5(10): e13255. doi:10.1371/journal.pone.0013255

S. PLANES

- Almany GR, Hamilton RJ, Bode M, Matawai M, Potuku T, Saenz-Agudelo P, Planes S, Berumen ML, Rhodes KL, Thorrold SR, Russ GR, Jones GP. 2013. Dispersal of grouper larvae drives local resource sharing in a coral reef fishery. *Current Biology*, 22: 1023-1028
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C. & Nyström, M. Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429, 827–33 (2004).
- Burke, L., Reyter, K., Spalding, M. & Perry, A. L. Reefs at Risk Revisited. (World Resources Institute, 2011).
- Filippo Ferrario, Michael W. Beck, , Curt D. Storlazzi, Fiorenza Micheli, Christine C. Shepard & Laura Airoldi, 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature communication*.
- Graham, N. a J. et al. Extinction vulnerability of coral reef fishes. *Ecol. Lett.* 14, 341–8 (2011).
- Graham NA, Bellwood DR, Cinner JE, et al. (2013) Managing resilience to reverse phase shifts in coral reefs. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(10), 541-548.
- Harrison HB, Williamson DH, Evans RD, Almany GR, Thorrold SR, Russ GR, Feldheim KA, van Herwerden L, Planes S, Srinivasan M, Berumen ML and Jones GP, 2012. Larval Export from Marine Reserves and the Recruitment Benefit for Fish and Fisheries. *Current Biology* 22: 1023-1028.
- MacNeil MA, Graham NA, Cinner JE, et al. (2015) Recovery potential of the world's coral reef fishes. *Nature*.
- Mumby PJ, Hastings A, Edwards JG (2007) Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature*, 450(7166), 98-101.
- Parravicini, V. et al. Global mismatch between species richness and vulnerability of reef fish assemblages. *Ecol. Lett.* 1101–1110 (2014). doi:10.1111/ele.12316
- Van Hooidonk, R., Maynard, J. A., Manzello, D. & Planes, S. Opposite latitudinal gradients in projected ocean acidification and bleaching impacts on coral reefs. *Glob. Chang. Biol.* 20, 103–12 (2014).
- Van Hooidonk R, Maynard JA, Planes S. 2013. Temporary refugia for coral reefs in a warming world. *Nature Climate Change*, 1829, DOI 10.103.

J.P. GATTUSO ET A. MAGNAN

- Bopp L., Magnan A. & Gattuso J.-P., 2015. Océans et climat : un duo inséparable. *Dossiers Pour la Science* 89:34-40.
- Gattuso J., Magnan A., Billé R., Cheung W. W. L., Howes E. L., Joos F., Allemand D., Bopp L., Cooley S., Eakin C. M., Hoegh-Guldberg O., Kelly R. P., Pörtner H., Rogers A. D., Baxter J. M., Laffoley D., Osborn D., Rankovic A., Rochette J., Sumaila U. R., Treyer S. & Turley C., 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science* 349:aac4722.
- Howes E. L., Joos F., Eakin M. & Gattuso J.-P., 2015. The Oceans 2015 Initiative, Part I: An updated understanding of the observed and projected impacts of ocean warming and acidification on physical and biological processes in the oceans. 51 p. Paris: IDDRI.
- Magnan A. K., Billé R., Cooley S. R., Kelly R., Pörtner H.-O., Turley C. & Gattuso J.-P., 2015. Intertwined ocean and climate: implications for international climate negotiations. IDDRI
- Weatherdon L., Rogers A., Sumaila R., Magnan A. & Cheung W. W. L., 2015. The Oceans 2015 Initiative, Part II: An updated understanding of the observed and projected impacts of ocean warming and acidification on marine and coastal socioeconomic activities/sectors. 44 p. Paris: IDDRI.

G. BEAUGRAND

- Beaugrand, G., K. M. Brander, J. A. Lindley, S. Souissi, and P. C. Reid. 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426:661-664.
- Beaugrand, G., M. Edwards, V. Raybaud, E. Goberville, and R. R. Kirby. 2015. Future vulnerability of marine biodiversity compared with contemporary and past changes. *Nature Climate Change* 5:695-701.
- Beaugrand, G., C. Luczak, and M. Edwards. 2009. Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology* 15:1790-1803.

V. STIGER

- Gallon RK, Robuchon M, Leroy B, Le Gall L, Valero M, Feunteun E (2014) Twenty years of observed and predicted changes in subtidal red seaweed assemblages along a biogeographical transition zone: inferring potential causes from environmental data. *Journal of Biogeography* 41, 2293–2306
- Lüning K (1990) Seaweeds. Their environment, Biogeography, and Ecophysiology. Wiley-Interscience ed., 527p.
- Oppliger LV, von Dassow P, Bouchemousse S, Robuchon M, Valero M, Correa JA, Mauger S, Destombe C (2014) Alteration of sexual reproduction and genetic diversity in the Kelp species *Laminaria digitata* at the Southern limit of its range. *PLoS ONE* 9(7): e102518
- Spalding MD, Fox HE, Allen GR, Davidson N, Ferdana ZA, Finlayson M, Halpern BS, Jorge MA, Lombana A, Lourie SA (2007) Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 57, 573–583.
- Voerman SE, Llera E, Rico JM (2013) Climate driven changes in subtidal kelp forest communities in NW Spain. *Marine Environmental Research* 90, 119-127

D. ALLEMAND

- Chen P-Y, Chen C-C, Chu LF, McCarl B (2015) Evaluating the economic damage of climate change on global coral reefs. *Glob Environ Change* 30: 12-20.
- Douglas AE (2003) Coral bleaching: how and why? *Mar Poll Bull* 46: 385-392.
- Erez J, Reynaud S, Silverman J, Schneider K, Allemand D (2011) Coral calcification under ocean acidification and global change. In: Dubinsky Z, Stambler N, editors. *Coral reefs: An ecosystem in transition*: Springer Netherlands. pp. 151-176.
- Hoegh-Guldberg O. (2011) The impact of climate change on coral reef ecosystems. In : Dubinsky Z, Stambler N, editors. *Coral reefs: An ecosystem in transition*: Springer Netherlands. pp. 391-403.
- Hoegh-Guldberg, O., R. Cai, E.S. Poloczanska, P.G. Brewer, S. Sundby, K. Hilmi, V.J. Fabry, and S. Jung, 2014: The Ocean. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1655-1731.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Loya Y, Sakai K, Yamazato K, Nakano Y, Sambali H, van Woesik R (2001) Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecol Lett* 4: 122 - 131 Reaka-Kudla, ML The global biodiversity of coral reefs: A comparison with rain forests. In: Reaka-Kudla, ML, Wilson, DE, Wilson, EO eds. (1997) *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Natural Resources*. Joseph Henry/Nat. Acad. Press, Washington, D.C, pp. 83-108
- Riegl BM, Purkis SJ, Al-Cibahy AS, Abdel-Moati MA, Hoegh-Guldberg O (2011) Present limits to heat-adaptability in corals and population-level responses to climate extremes. *PLoS ONE* 6: e24802.
- Shamberger, K. E. F., A. L. Cohen, Y. Golbuu, D. C. McCorkle, S. J. Lentz, and H. C. Barkley (2014), Diverse coral communities in naturally acidified waters of a Western Pacific Reef. *Geophys Res Lett* 41, doi:10.1002/2013GL058489.
- Van Oppen MJH, Oliver JK, Putnam HM, Gates RD (2015) Building coral reef resilience through assisted evolution. *Proc Natl Acad Sci* 112: 2307–2313.

CRÉDITS PHOTOS

Première de couverture

M.Ormestad-Kahikai-Tara-Oceans

Sommaire

V.Hilaire/TaraExpeditions.org

5

Christian Sardet / CNRS / Tara-Oceans

6-7

Thomas Vignaud

8-9

Thomas Vignaud

12-13

NASA space-science.arc.nasa.gov

14-15

Christian Sardet / Tara Oceans / CNRS / Chroniques du Plancton

16-17

Atsuko Tanaka

16-17

Christian Sardet / Tara Oceans / CNRS / Chroniques du Plancton

18-19

Luc Beaufort

20-21

Gérard Pergent

22-23

Martial Dosdane, Province Sud de Nouvelle-Calédonie

24-25

Wilfried Thomas, Station Biologique de Roscoff

26-27

Alexis Rosenfeld

32-33

Christian Sardet / Tara Oceans / CNRS / Chroniques du Plancton

34-35

Catherine Gabrié

36-37

Valérie Fakir

38-39

Erwan Amice - CNRS

40-41

Eric Tambutté – Centre Scientifique de Monaco

42-43

Thomas Vignaud

46-47

Thomas Vignaud

48-49

Christian Sardet / Tara Oceans / CNRS / Chroniques du Plancton

52-53

Sandrine Ruitton

54-55

Sandrine Ruitton

56-57

Martial Dosdane, Province Sud de Nouvelle-Calédonie

58-59

Franck Mazeas

60-61

Serge Andrefouet - IRD

62-63

Eric Tambutté – Centre Scientifique de Monaco

64-65

Thomas Vignaud

68-69

Thomas Vignaud

82-83

Franck Mazeas

Dernière de couverture

Christian Sardet / Tara Oceans / CNRS / Chroniques du Plancton





FONDS FRANÇAIS POUR L'ENVIRONNEMENT MONDIAL

Secrétariat du FFEM

Agence Française de Développement
5, rue Roland Barthes 75598 Paris Cedex 12
TEL. +33 1 53 44 42 42 - FAX +33 1 53 44 32 48
<http://www.ffem.fr> • Courriel : ffem@afd.fr

Ministère des Finances et des Comptes Publics

Direction générale du Trésor
139, rue de Bercy 75572 Paris cedex 12
<http://www.economie.gouv.fr/>

Ministère des Affaires étrangères et du Développement international

Direction générale de la Mondialisation, du Développement
et des Partenariats
Sous-direction du Climat et de l'Environnement
27, rue de la Convention - CS 91533 - 75732 Paris cedex 15
<http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/>

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie

Direction des Affaires européennes et internationales
Tour Pascal A - 92055 La Défense CEDEX
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Direction générale pour la recherche et l'innovation
1, rue Descartes - 75005 Paris
<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/>

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

Sous-direction des Echanges internationaux
3, rue Barbet-de-Jouy - 75349 Paris 07 SP
<http://agriculture.gouv.fr/>

Agence Française de Développement

5, Rue Roland Barthes 75598 Paris Cedex 12
<http://www.afd.fr>