





# LES ÉCOSYSTÈMES MARINS

Plancton océanique, Climat et Développement

**Remerciements particuliers à :**

Janique Etienne, Éric Karsenti, Lars Stemmann,  
Baye Cheikh Mbaye, Olivier Jaillon, Janaina Rigonato,  
Serge Planes, Denis Allemand, Chris Bowler,  
Alejandro Mass et Damien Eveillard  
Nous remercions Céline Bricard pour l'utilisation  
de ses magnifiques aquarelles

**Droits d'auteur :**

Fondation Tara Océan

**Production et coordination éditoriale :**

Romy Hentinger et André Abreu, Fondation Tara Océan  
Janique Etienne, Chargée de projets Ecosystèmes marins et côtiers,  
Secrétariat du FFEM

**Édition et mise en page :**

Bruno Marie/ insularis@me.com  
Marine Prost, Fondation Tara Océan

**Textes :**

Adam Gristwood et André Abreu

**Illustrations :**

Céline Bricard, pp 2, 3, 7, 11, 22, 39  
Christian Sardet, pp 28

**Référence pour citation :**

FFEM et Fondation Tara Océan (2023) - Les écosystèmes marins -  
Plancton océanique, Climat et Développement.  
Fonds Français pour l'Environnement, Paris et Fondation Tara Océan, Paris. pp 72

Utilisation possible des informations sous réserve de la mention : ©Fondation Tara Océan/FFEM  
Utilisation possible des photos sous réserve de la mention des crédits tels qu'ils sont mentionnés  
dans l'ouvrage

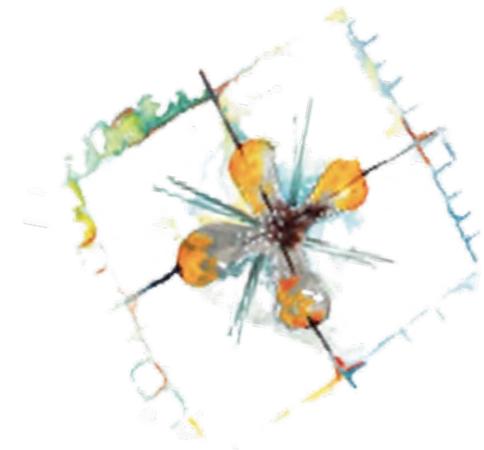
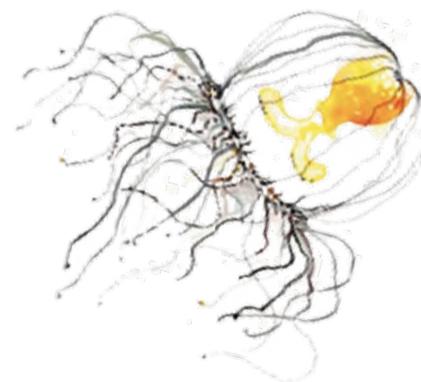
Utilisation possible des illustrations et carte dans un cadre pédagogique (non commercial)  
sous réserve de la mention :

illustrations Cécile Bricard : ©Cécile Bricard

illustration Christian Sardet : ©Christian Sardet

carte : ©Federico Ibarbalz, Chris Bowler et Lucie Zinger

Modifications non autorisées





## Table des matières

---

Acronymes	4
Avant-propos	5
Introduction	7
<b>I. Plancton, origine de la vie et fondement de la machine climatique</b>	<b>11</b>
Comprendre les fonctions essentielles du plancton	15
L'expédition <i>Tara Oceans</i> : une étape majeure pour les sciences océaniques	19
<b>II. Comprendre les écosystèmes planctoniques pour préserver l'Océan</b>	<b>23</b>
Le programme <i>Tara Oceans</i> : des découvertes scientifiques inédites	25
Le programme <i>Tara Pacific</i> : dévoiler la complexité microscopique des récifs	37
<b>III. Pour une science ouverte : coopération internationale et dialogue politique</b>	<b>45</b>
Soutenir les collaborations scientifiques et le renforcement des capacités	47
Partager les connaissances avec les décideurs politiques	51
<b>IV. Dix recommandations pour les sciences océaniques</b>	<b>61</b>
<b>V. Conclusion</b>	<b>67</b>

## Acronymes

- AMP:** Aire Marine Protégée
- BBNJ:** Biodiversity Beyond National Jurisdiction (biodiversité au-delà des juridictions nationales)
- CEA:** Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
- CNRS:** Centre National de la Recherche Scientifique
- DSI:** Information de séquençage numérique
- EBI:** Institut Européen de Bioinformatique
- EMBL:** Laboratoire Européen de Biologie Moléculaire
- FFEM:** Fonds Français pour l'Environnement Mondial
- GIEC:** Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- KOPAs:** Key Ocean Planktonic Areas
- LOV:** Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer
- MIT:** Massachusetts Institute of Technology
- NASA:** National Aeronautics and Space Administration
- ODD:** Objectifs de Développement Durable
- ORGP:** Organisations Régionales de Gestion des Pêches
- PSL:** Paris Sciences & Lettres
- UNCDB:** Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique
- VEB:** Variables Essentielles de la Biodiversité
- ZMO:** Zones de Minimum d'Oxygène

## Avant-propos

Janique Etienne • Fonds Français pour l'Environnement Mondial

Engagé depuis 1994 au service du développement et en faveur de la biodiversité, le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) soutient depuis 10 ans la préservation de la biodiversité en haute mer, qui constitue les deux-tiers de la surface océanique.

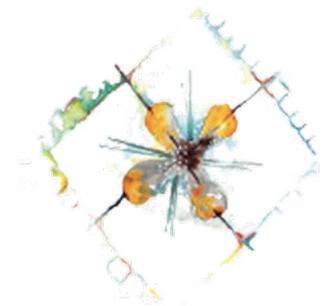
L'Océan concentre en effet des enjeux essentiels tels que l'alimentation humaine par la pêche et l'aquaculture, la régulation des températures et de la quantité de gaz carbonique produite par les activités humaines, ainsi qu'une biodiversité exceptionnelle et méconnue. Exploitation des ressources halieutiques et potentiellement des ressources minières des grands fonds, réceptacle des pollutions atmosphériques et en provenance des bassins versants, les pressions sont telles aujourd'hui que ces fonctions pourraient ne plus être assurées.

Au-delà des eaux territoriales, nous n'avons jamais été aussi proches du point de rupture des équilibres vitaux. L'appui à l'acquisition des connaissances sur les écosystèmes océaniques, la mobilisation de cette connaissance pour la prise de décision et la gestion de zones importantes à protéger, le partage des outils développés à tous les États concernés et en particulier aux États côtiers, nous paraissent fondamentaux et sont au cœur de la stratégie du FFEM sur l'Océan.

La protection du plancton océanique, moins médiatique que celle des grands mammifères marins, est néanmoins essentielle à notre survie. Le plancton constitue une part importante de la biomasse océanique et est à l'origine des interactions entre organismes marins nécessaires au maintien des équilibres.

La collaboration entre le FFEM et la Fondation Tara Océan a démarré en 2015 avec l'instruction du projet *Plancton océanique, Climat et Développement* : ce fut le début d'une aventure collective qui a transformé nos modes d'actions respectifs.

Elle se poursuit aujourd'hui avec un nouveau projet qui permettra de mesurer le développement du plancton dans les systèmes d'upwelling des courants de Humboldt et des Canaries. Il permettra également de mieux comprendre ses services de séquestration de carbone et sa contribution au renouvellement des stocks de poissons. Il visera aussi à accompagner la mise en œuvre du Traité sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale, qui a été accepté à l'unanimité par 193 États le 4 mars 2023, au siège des Nations Unies à New York.



# Introduction

Romain Troublé • Directeur général, Fondation Tara Océan

Depuis plus de trois milliards d'années, les communautés planctoniques forment la base de la vie sur Terre, dérivant à travers l'Océan et jouant un rôle essentiel pour la planète. Aujourd'hui, ces communautés invisibles sont menacées, leurs comportements et fonctions évoluent du fait des impacts cumulatifs de la crise écologique globale.

Les modèles climatiques actuels prédisent une augmentation des températures et de l'acidification de l'Océan, ainsi qu'une diminution de son niveau d'oxygène. Il est donc nécessaire d'intensifier les observations et l'analyse de ces communautés planctoniques dans l'Océan, en particulier dans les régions moins étudiées telles que l'Atlantique Sud et les régions polaires. La Fondation Tara Océan a pour objectif de combler ces manques de connaissances en mettant en relation des chercheurs et des institutions multidisciplinaires à travers le monde afin de mettre en lumière cet univers caché.

**Le projet *Plancton océanique, Climat et Développement* a été lancé en 2016 par la fondation en partenariat avec le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM). Il a permis de renforcer cette approche collaborative de la recherche en intégrant de jeunes chercheurs de pays actuellement sous-représentés dans la recherche océanographique au sein d'un programme de recherche qui explore la richesse des données de l'expédition *Tara Oceans*.**

Six jeunes chercheurs et chercheuses originaires d'Argentine, du Brésil, du Chili, du Sénégal et du Togo, ont participé au projet. Leurs recherches, dont plusieurs ont été publiées dans des revues scientifiques de premier plan en collaboration avec le consortium scientifique *Tara Oceans*, ont comblé des lacunes dans notre compréhension sur les liens entre l'écosystème planctonique, l'atmosphère, la biodiversité et le climat.



Étienne Bourgois, président de la Fondation Tara Océan et Romain Troublé à bord de la golette *Tara*  
© Fondation Tara Océan



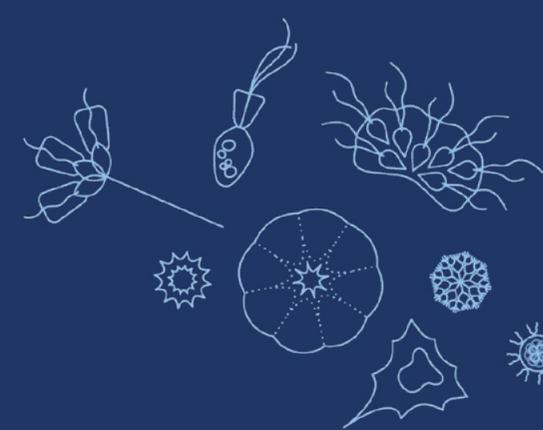
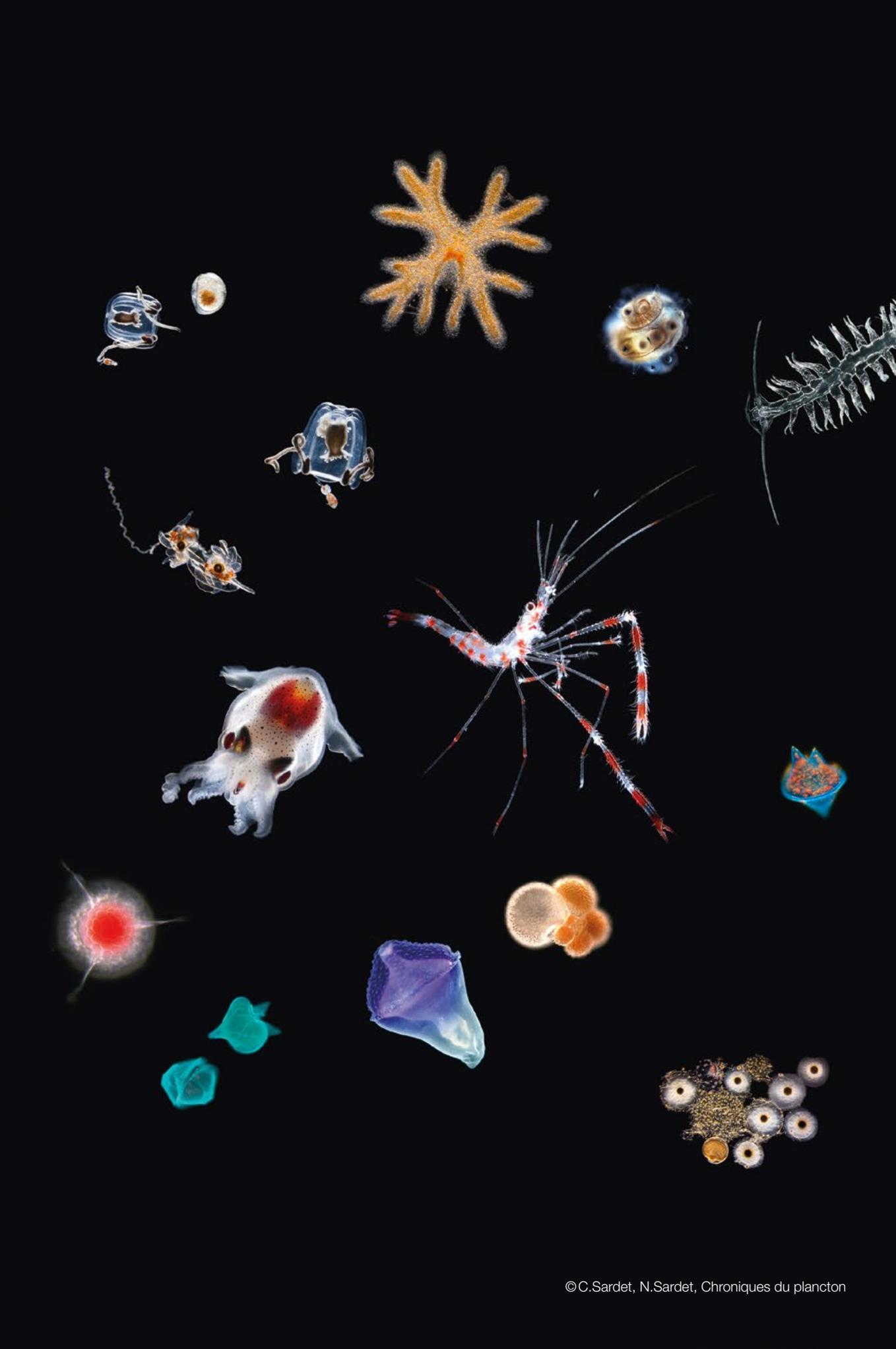
Durant le projet, des études ont été menées sur le rôle des communautés planctoniques dans le transfert du carbone vers les profondeurs océaniques à l'échelle mondiale.

**Les scientifiques ont étudié la morphologie des organismes planctoniques, analysé leurs génomes, mesuré leurs tailles, modélisé leurs comportements et prédit leurs fonctions en se basant sur les données recueillies au cours de l'expédition. L'objectif était d'explorer le rôle des communautés planctoniques et leurs dynamiques dans la production primaire mondiale, et comment cet écosystème soutient la pêche et d'autres formes de vie marine.**

En parallèle, des progrès technologiques remarquables ont été réalisés dans certains domaines scientifiques, en particulier en génomique et en bioinformatique. Le projet a joué un rôle clé pour développer de nouveaux modèles, prédictions et outils de suivi basés sur des données quantitatives incluant tous les royaumes de la vie marine.

**Au-delà des avancées scientifiques produites, ces jeunes chercheurs et chercheuses ont également été invités à participer à des événements politiques. L'un des objectifs du projet était de sensibiliser les experts des écosystèmes planctoniques sur les efforts nécessaires pour mieux connecter la science aux questions de développement afin d'assurer la sécurité alimentaire et appuyer les politiques d'adaptation et d'atténuation au changement climatique.**

Un effort politique important est nécessaire de la part des institutions et des bailleurs de fonds pour garantir que les informations factuelles soient portées à la société et aux décideurs. Il est urgent de soutenir les politiques publiques de conservation et d'utilisation durable des ressources marines vivantes.



Partie



# PLANCTON

Origine de la vie et fondement de la machine climatique



## Qu'est-ce que le plancton ?

Le plancton est l'ensemble des microorganismes qui dérivent au gré des courants. Ils ont été la première forme de vie sur Terre et ils demeurent encore prédominants dans l'Océan aujourd'hui. Des populations planctoniques de taille variable (de 0,2 micromètre à quelques centimètres), telles que les virus, bactéries, archées, microalgues, champignons, protistes et zooplanctons, peuplent par milliards chaque litre d'eau de mer.

**80 % de la biomasse océanique est composée d'organismes planctoniques.**

Ces organismes se trouvent en abondance dans presque tous les paysages marins, depuis la surface jusqu'au plancher océanique, en passant par les événements hydrothermaux, la glace polaire, les ailerons, les pinces et les écailles.

Malgré cette diversité, ils forment ensemble un écosystème intégré et jouent un rôle majeur dans de nombreux processus mondiaux clés :

- ils enrichissent l'Océan avec des nutriments essentiels à la vie ;
- ils produisent la moitié de l'oxygène actuellement disponible dans l'atmosphère terrestre ;
- ils sont à l'origine des processus transportant d'importantes quantités de carbone vers les profondeurs océaniques où il est séquestré pendant des millions d'années ;
- ils forment également la base du réseau trophique océanique.

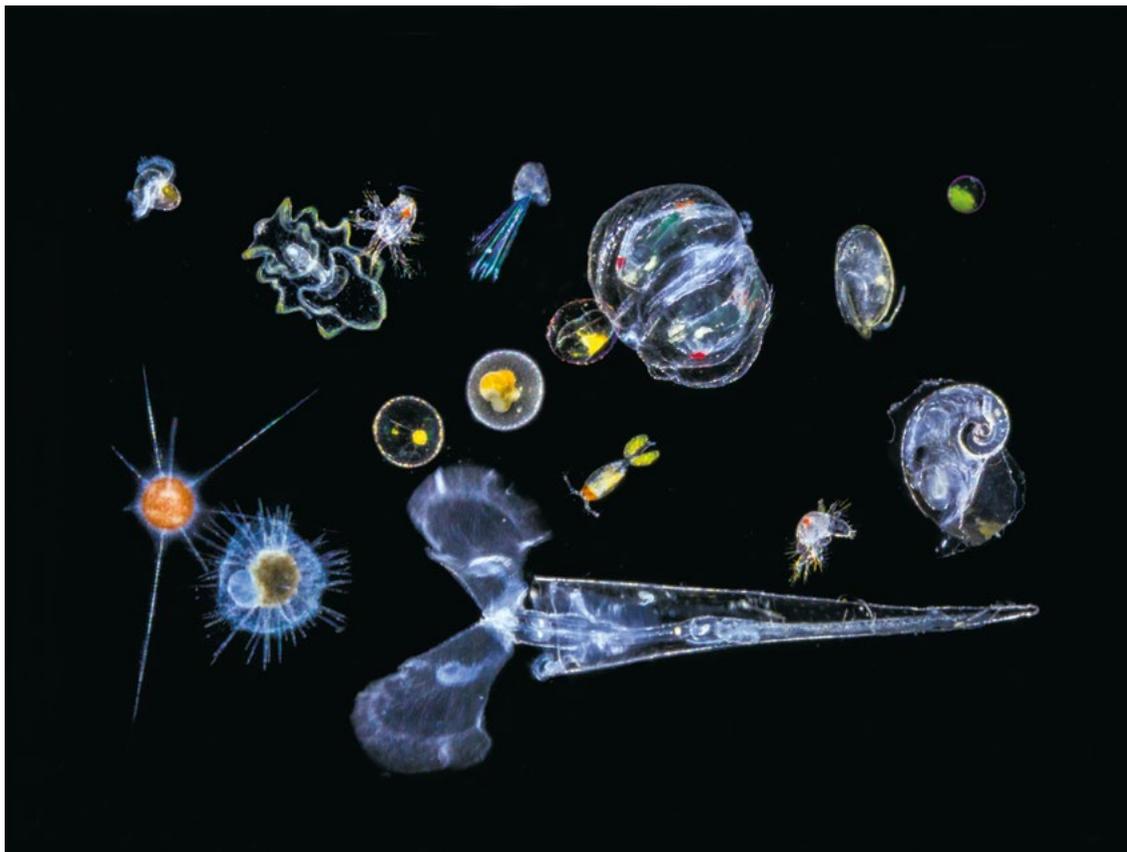
En dépit de leur importance vitale et de leur omniprésence dans l'Océan, notre compréhension des écosystèmes planctoniques marins est encore très limitée.

L'étude du spectre de la vie sur l'ensemble du réseau trophique océanique est récente. Elle permet aux scientifiques d'en apprendre davantage sur la nature des organismes planctoniques, leur génétique, leurs caractéristiques, leurs communautés et leurs rôles essentiels pour l'ensemble des écosystèmes de l'Océan.

La biologie des écosystèmes requiert une approche multidisciplinaire qui étudie à la fois les molécules, les cellules, les populations, les communautés, les écosystèmes et les impacts qu'ils subissent. Ce nouveau pan de la recherche amène peut-être autant de nouvelles questions que de réponses. Néanmoins, l'ampleur des découvertes et la progression des connaissances montrent que le plancton constitue l'une des grandes explorations marines à venir.

L'expédition *Tara Oceans* (2009-2013), dédiée à l'étude du plancton, a parcouru la planète pour recueillir plus de 35 000 échantillons et les analyser. **Depuis 2015, *Tara Oceans* a généré, directement et indirectement, environ 1 000 publications, dont une vingtaine d'articles majeurs dans *Nature*, *Science*, *Cell*, etc.** Elles soulignent le rôle central que joue le plancton dans le maintien de l'équilibre climatique et des écosystèmes en tant que producteur primaire et source d'alimentation pour une diversité d'espèces.

L'expédition, puis désormais le programme scientifique *Tara Oceans*, démontre que malgré l'immensité de l'Océan et la petite taille du plancton, il est possible et crucial de mener des projets d'étude sur ces microorganismes dans l'Océan. **Ce qui était initialement une initiative audacieuse est devenu un programme international, multidisciplinaire et collaboratif ayant transformé notre compréhension des écosystèmes océaniques.**



#### Le plancton à la base du réseau trophique

Parce que les microorganismes planctoniques sont à la base des réseaux trophiques marins, leur abondance et leur diversité déterminent la structure de l'ensemble des communautés, depuis les poissons jusqu'aux grands prédateurs, en passant par les mammifères et les oiseaux marins. Tout comme les êtres humains, les grands prédateurs ont leurs préférences en matière de nourriture. Aussi, la composition des communautés planctoniques, la taille et la valeur nutritive des différentes espèces ont des conséquences directes sur l'alimentation, le succès de reproduction, la densité de population et la dynamique écologique des espèces majeures vivant à leur proximité. En aval de la chaîne alimentaire, cela peut avoir un impact important sur les moyens de subsistance des communautés humaines, notamment côtières, avec des conséquences sur l'aquaculture, la pêche et le tourisme, par exemple.



#### Le plancton : un élément clé de la connexion entre les bassins océaniques

En dérivant, le plancton assure la connectivité entre les différentes régions océaniques. Cette fonction est essentielle car l'Océan est le plus grand écosystème continu sur la planète (71% de la surface de la Terre). Il est toutefois étonnamment hétérogène. La combinaison des caractéristiques des paysages marins, des gradients physicochimiques (température et salinité, par exemple) et des courants océaniques crée des frontières et des communautés biologiques séparées, comprenant des espèces endémiques spécifiques.

**En raison de leurs tailles, les microorganismes planctoniques traversent ces frontières physiques plus facilement que les espèces plus grandes. Cela montre l'importance du monde planctonique dans le maintien d'une certaine continuité biologique entre les différentes zones océaniques.**

De plus, les évolutions climatiques actuelles conduisent à des changements dans les habitats de certaines espèces. Ces tendances ont été décrites sur Terre, où les variations de température et d'humidité conduisent à l'apparition de certaines espèces végétales et animales dans des zones où elles étaient précédemment absentes. Le même phénomène se produit dans l'Océan, où des changements dans les propriétés physicochimiques de certaines eaux poussent des espèces à migrer vers de nouvelles régions, y compris des espèces microscopiques. Ce changement est généralement associé aux eaux tempérées qui se réchauffent et aux espèces planctoniques tropicales qui y migrent. Ce phénomène pourrait accentuer les changements physicochimiques dans ces eaux mais aussi engendrer des disparités entre la présence de plancton et celle de plus grandes espèces qui s'en nourrissent, aggravant encore le déséquilibre au sein des écosystèmes.

## Le rôle du plancton dans la pompe à carbone biologique

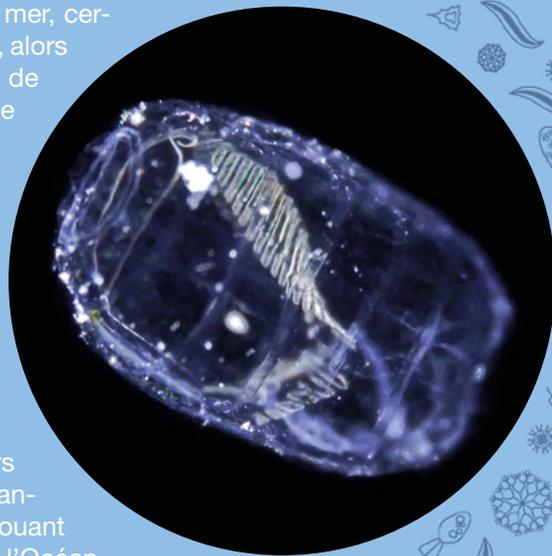
Le phytoplancton est le principal acteur à l'origine de la pompe à carbone biologique, un processus absorbant le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère via la photosynthèse dans l'Océan. La photosynthèse génère de l'oxygène, nécessaire aux organismes pour respirer, ainsi que du carbone organique par le biais de la croissance des organismes photosynthétiques. Cette forme de carbone organique est le point de départ des chaînes alimentaires marines.

**Quand les organismes planctoniques meurent, ils tombent au fond de l'Océan sous l'effet de la gravité, ce phénomène est appelé «neige marine». Leur accumulation progressive au fil des millénaires sur le plancher océanique se transforme en matière minérale** qui, dans certains cas, peut devenir des combustibles fossiles comme le pétrole et le gaz. Chaque année, les êtres humains brûlent ainsi environ un million d'années de plancton ! Certaines particules de carbone constituent une source d'énergie et sont consommées par d'autres espèces. Le carbone organique est donc susceptible de réapparaître dans l'atmosphère sous la forme de sous-produits du métabolisme de ces espèces, ne contribuant dès lors pas au stockage du carbone à long terme.

### Les espèces planctoniques intervenant dans la pompe à carbone

#### Salpidae

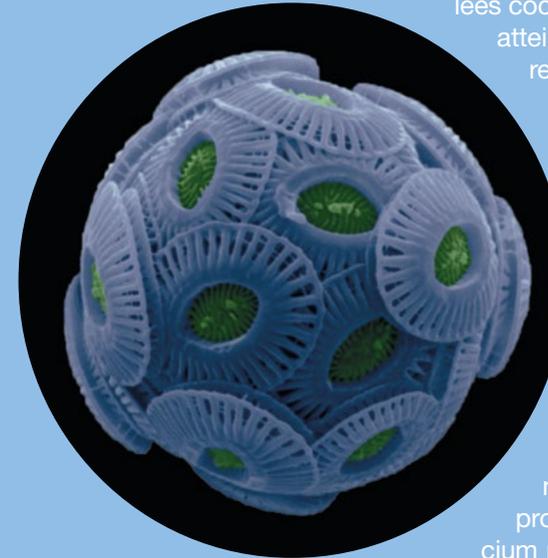
Chatoyant dans les eaux comme un serpent de mer, certaines chaînes de Salpidae vivent une vie solitaire, alors que d'autres s'agrègent. Parmi les 50 espèces de Salpidae connues, bon nombre ont l'apparence de méduses, mais appartiennent au sous-embranchement des Tuniciers (aussi connu sous le nom de jupes de mer). Les Salpidae alternent des générations d'individus sexués et asexués. Les Salpidae deviennent adultes en l'espace de seulement 2-5 jours, ce qui leur permet de tirer parti des proliférations de phytoplancton, une source majeure de subsistance. **Ces animaux jouent un rôle crucial dans le cycle des nutriments entre les différentes couches de l'Océan.** Les débris issus de leurs corps et leurs interactions peuvent transporter de grandes quantités de carbone vers le plancher océanique, jouant ainsi un rôle majeur dans la pompe à carbone de l'Océan.



Salpidae: © Franck Preijger

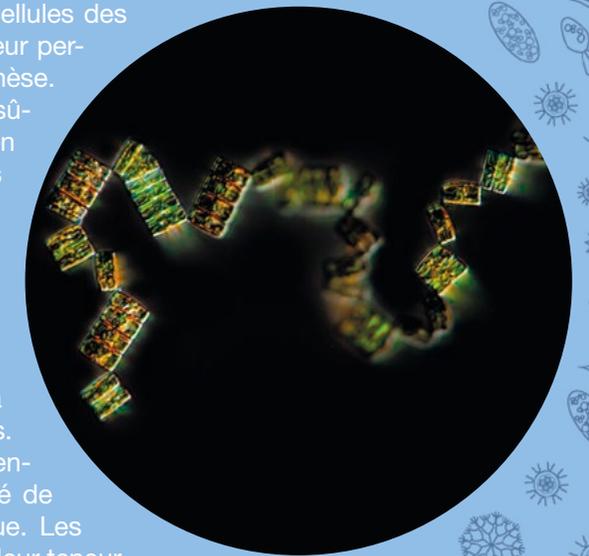
#### Coccolithophores

À certaines périodes, des populations d'algues unicellulaires appelées coccolithophores prolifèrent sur des distances pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres, ce qui les rend visibles de l'espace. Les coccolithophores sont des régulateurs essentiels de la teneur en dioxyde de carbone océanique et atmosphérique. Ils font partie d'un groupe diversifié d'organismes marins photosynthétiques unicellulaires, le phytoplancton. **Collectivement, le phytoplancton produit plus d'oxygène que toutes les forêts tropicales du monde.** Ces organismes se trouvent à la base de la chaîne alimentaire, assurant la subsistance d'autres organismes unicellulaires tels que les foraminifères, qui les capturent en étendant leurs membranes cellulaires avant de les attirer dans leurs coquilles minérales. À leur mort, les coccolithophores s'enfoncent dans l'océan profond, où leurs exosquelettes de carbonate de calcium peuvent séquestrer le carbone pendant des milliers d'années. Certains de ces dépôts cellulaires se transforment en falaises, comme celles emblématiques de Douvres, qui s'étendent sur plus de 15 kilomètres le long de la côte sud de l'Angleterre et atteignent plus de 100 mètres de hauteur.



#### Diatomées

Les diatomées constituent un groupe de phytoplancton unicellulaire présentant une diversité incroyable de formes et de tailles et vivant dans une grande variété d'habitats. Les cellules des diatomées contiennent des chloroplastes qui leur permettent d'obtenir leur énergie par photosynthèse. Leur caractéristique la plus remarquable est sûrement leur enveloppe cellulaire, construite en silice transparente, très similaire au verre. **Elles constituent l'une des formes de vie les plus importantes de la planète et sont à l'origine de près de la moitié des composés organiques formés dans l'Océan et de la production d'une grande partie de l'oxygène atmosphérique.** Les diatomées sont également utilisées en paléoclimatologie et pour la prédiction des changements climatiques futurs. Les fluctuations de leurs populations peuvent renseigner sur l'acidification de l'Océan, la qualité de l'eau et les niveaux de carbone atmosphérique. Les marquages routiers s'éclairent la nuit du fait de leur teneur en frustules (coquilles) de diatomées aux propriétés réfléchissantes. Les milliers de formes différentes des diatomées sont également à l'origine de nombreuses avancées scientifiques dans divers domaines (nanotechnologie, médecine, etc.).



Coccolithophore: © M. Carmichel - N. Le Bescot/EPPO/SB Roscoff/CNRS  
Diatomée: C. Sardet, N. Sardet • Chroniques du plancton

### L'expédition *Tara Oceans* : une étape majeure pour les sciences océaniques



#### » Éric Karsenti

«L'écosystème océanique est l'origine et la base de la vie sur Terre. Encore aujourd'hui, l'équilibre climatique est largement déterminé par cet écosystème. Pourtant, nous en savons plus sur la Lune que sur lui.

De nombreux mystères persistent sur l'origine de la vie, qui a commencé dans l'Océan, sur les principes ayant conduit à la complexité de la vie sur Terre ou encore sur la manière dont la diversité actuelle est déterminée. Nous commençons tout juste à comprendre les impacts de la hausse des températures et du changement climatique. Nous sommes toujours incapables de déterminer scientifiquement les quotas de pêche sur la base de données quantitatives ou encore de développer une aquaculture écologique sans antibiotiques. Le consortium scientifique *Tara Oceans* et la fondation ont lancé l'expédition en 2009 afin de combler

cet important manque de connaissances en mettant en œuvre les technologies les plus récentes en matière de collecte d'échantillons, de séquençage génomique à haut débit, de bioinformatique, de physique, d'imagerie et d'intelligence artificielle. L'analyse des résultats a commencé à être publiée et partagée en 2015 mais nous en sommes encore aux premiers stades de cette percée qui va transformer la façon dont nous voyons l'Océan, de la même manière que la génétique a transformé la médecine et la prévention du cancer.»

**Éric Karsenti, fondateur et coordonnateur du consortium *Tara Oceans*. Biologiste cellulaire au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL) et directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)**

## L'expédition *Tara Oceans* (2009-2013)

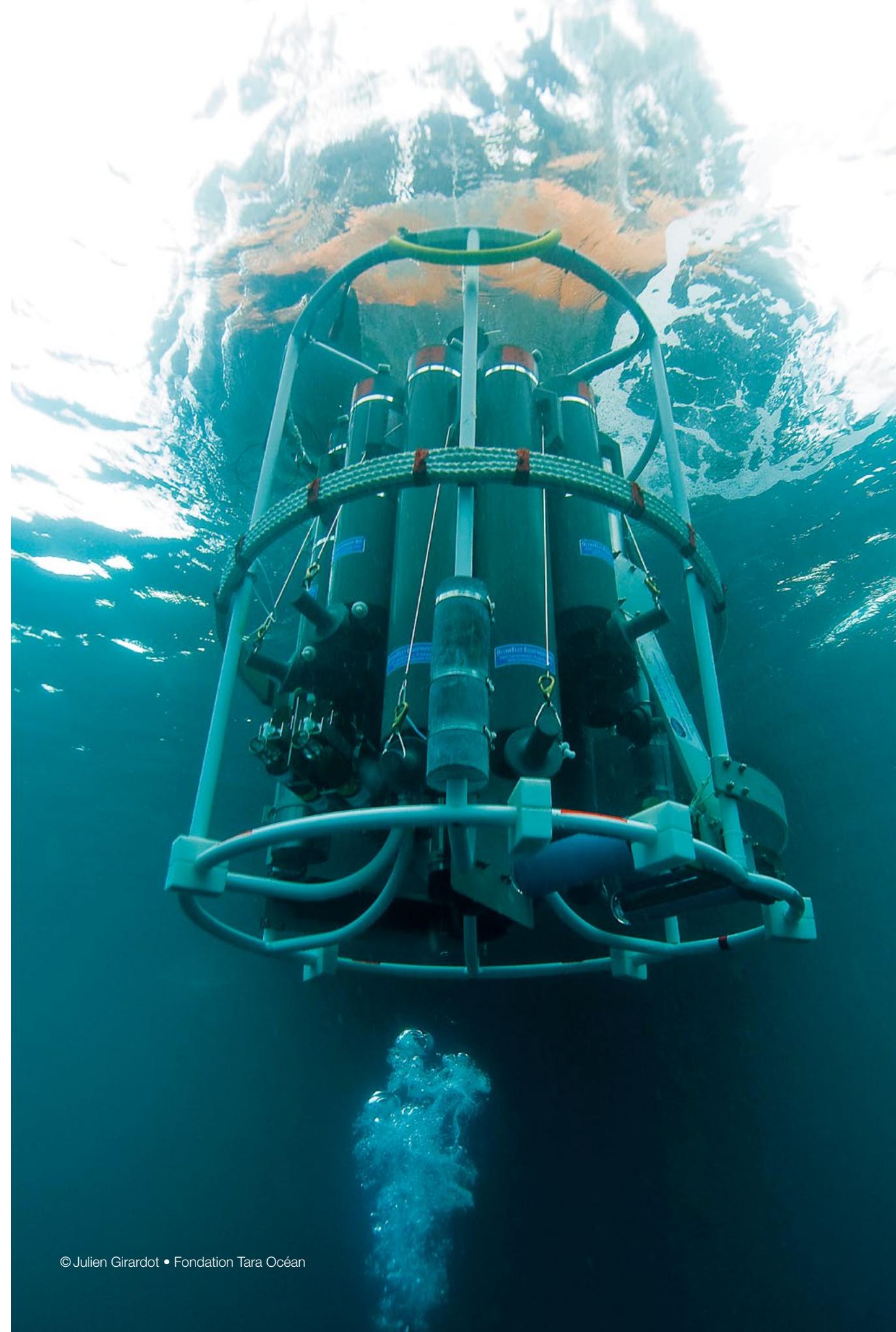
Initiée par la Fondation Tara Océan et Éric Karsenti, l'expédition *Tara Oceans* a réuni divers laboratoires internationaux au sein d'un projet ambitieux visant à établir la première description biologique exhaustive des organismes planctoniques jusqu'à 1 000 mètres de profondeur, à l'échelle mondiale.

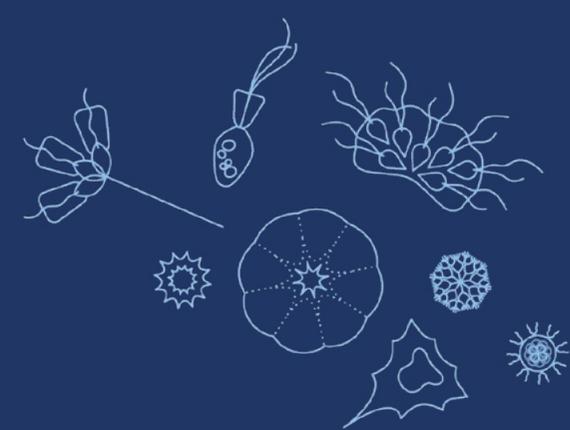
Pendant 4 ans (2009-2013), la goélette scientifique *Tara* et 25 laboratoires associés ont parcouru les mers du monde, y compris l'Arctique et l'Antarctique, recueillant 35 000 échantillons de virus, de bactéries, d'algues et de zooplancton. Grâce à l'utilisation de technologies de pointe (séquençage d'ADN à haut débit, imagerie par microscopie à haute vitesse, bioinformatique, intelligence artificielle, etc.) l'expédition a conduit à de grandes avancées. **À ce jour, il s'agit du plus grand effort de séquençage génétique jamais réalisé sur les organismes marins. Cette recherche a mis en évidence un grand nombre d'espèces, ainsi que des gènes microbiens auparavant inconnus.**

Depuis 2015, le programme de recherche *Tara Oceans* a généré, directement et indirectement, **environ 1 000 publications, dont une vingtaine d'articles majeurs dans *Nature*, *Science*, *Cell*, etc.** Les données *Tara Oceans* sont en libre accès pour la communauté scientifique internationale à l'Institut européen de bioinformatique (EBI), dans l'infrastructure Euro-BiImaging et sur la base de données Pangea. Ces jeux de données constituent une référence pour la biodiversité planctonique. Ils ont été conçus pour mieux comprendre sa distribution, son évolution et ses capacités d'adaptation. Cette exploration, sans précédent de par son échelle et son approche holistique, a contribué à sensibiliser le grand public à la beauté fascinante de cette diversité d'espèces invisibles à l'œil nu et à leur importance dans les grands équilibres de la vie sur Terre.

### Chiffres clés

- **35 000** échantillons prélevés dans le monde entier pendant 4 ans (2009-2013)
- **25** laboratoires partenaires, 250 scientifiques impliqués
- **12** disciplines impliquées dans le consortium *Tara Oceans*
- **150 millions** de nouveaux gènes analysés et séquencés
- **130 000** nouvelles espèces marines microscopiques découvertes
- **Près de 200 000** types de virus marins révélés, soit 97 % de nos connaissances actuelles





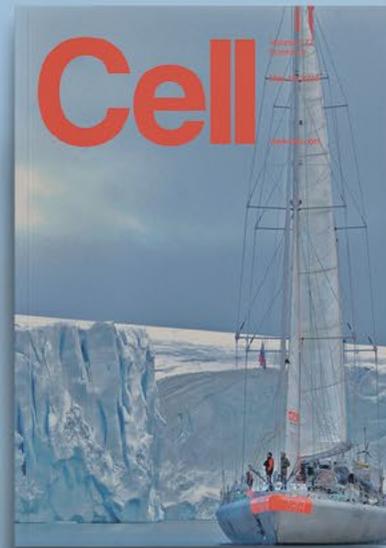
Partie



# COMPRENDRE

Les écosystèmes planctoniques pour préserver l'Océan





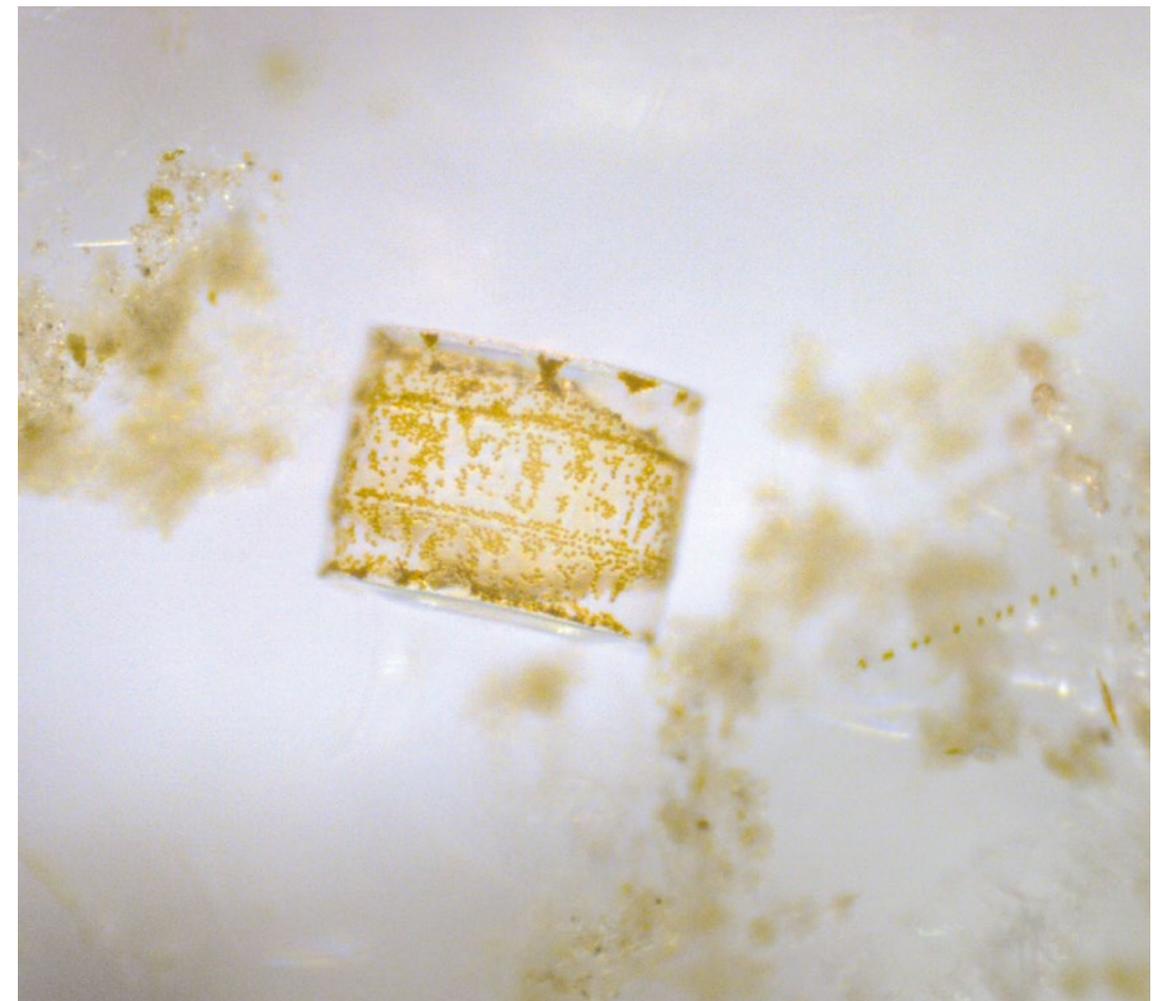
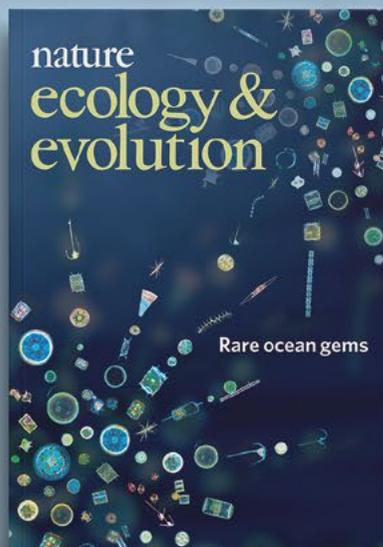
## CHAPITRE 1

### Le programme *Tara Oceans* : des découvertes scientifiques inédites

La recherche *Tara Oceans* révèle également comment ces communautés, aussi invisibles que vitales, évoluent en réponse aux impacts des activités humaines telles que le changement climatique, les pollutions et l'acidification de l'Océan.

Les découvertes réalisées grâce à l'analyse des données et des échantillons recueillis au cours de l'expédition ont le potentiel de changer notre compréhension du plancton et des écosystèmes marins. **La recherche *Tara Oceans* met ainsi en évidence des corrélations, des fonctions, des rivalités et des symbioses robustes entre les organismes planctoniques et leurs milieux.**

La recherche sur le plancton n'est qu'à ses débuts, beaucoup reste encore à découvrir. *Tara Oceans*, parmi d'autres programmes internationaux, contribue à mettre en place les pièces du puzzle et à révéler l'univers incroyable de ces organismes.





## Explorer la biodiversité planctonique et comprendre ses rôles dans l'écosystème océanique

La majorité des gènes analysés et séquencés par le consortium *Tara Oceans* a des fonctions inconnues. Des progrès significatifs ont été réalisés dans l'exploration de ces fonctions grâce à l'étude des espèces et des communautés planctoniques.

**Les données *Tara Oceans* en accès libre permettent aux chercheurs de réaliser des atlas mondiaux des gènes planctoniques. L'étude de ces puzzles génétiques fournit aux scientifiques des défis passionnants à relever.**

Ces données contribuent à l'élaboration de modèles mathématiques utilisés pour prédire les interactions des populations planctoniques, leurs rôles et leurs fonctions dans l'écosystème. Ils permettraient par exemple de mieux estimer quantitativement et qualitativement les espèces de poissons par région en fonction des populations de plancton présentes dans ces eaux.

De telles méthodes qui intègrent les connaissances génétiques, morphologiques et écologiques permettent de retranscrire plus précisément la complexité des écosystèmes planctoniques et de leur environnement. Les données ont notamment permis aux chercheurs de prédire comment la composition des nutriments dans l'eau de mer peut stimuler la croissance de microalgues, et de mieux comprendre la capacité étonnante des espèces planctoniques à s'adapter dans différents environnements.

## Cartographier la biodiversité planctonique

Le plancton n'est pas uniformément réparti à travers l'Océan, certaines espèces sont adaptées à des habitats spécifiques au sein desquels les conditions telles que la température, la salinité et la disponibilité des nutriments sont plus favorables à leur croissance et à leur développement.

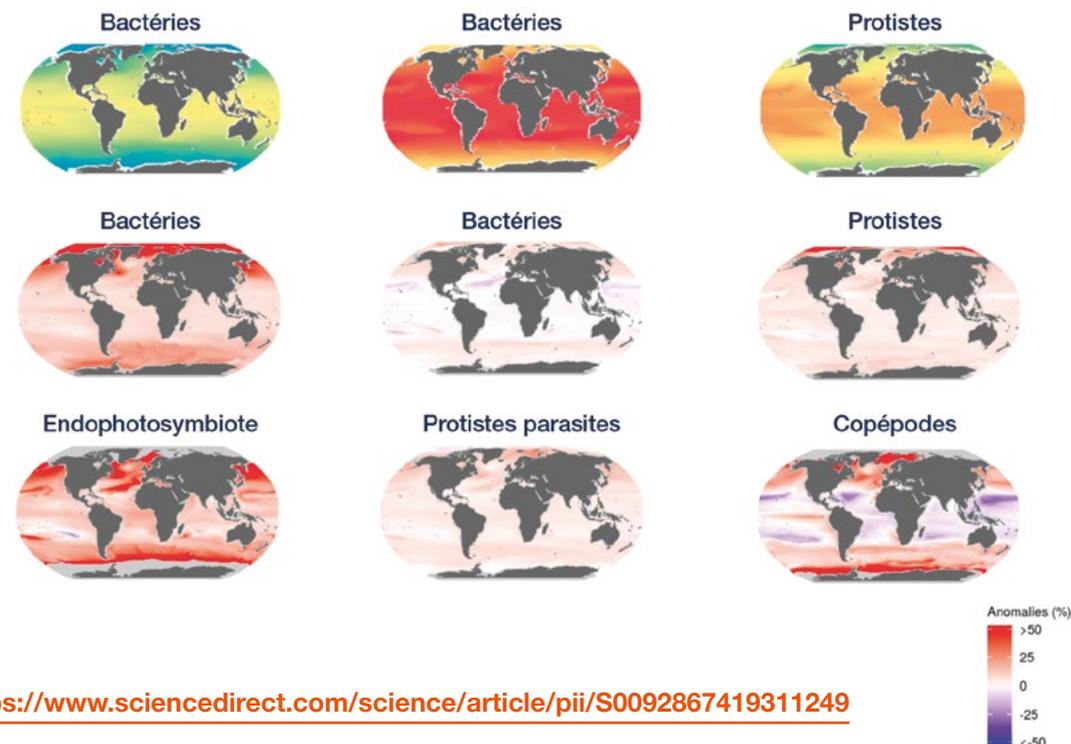
D'autres espèces planctoniques, dites « généralistes », sont présentes dans de nombreuses zones dans l'Océan.

**Les données *Tara Oceans* permettent de cartographier les distributions mondiales de plancton et les zones avec une forte biodiversité planctonique. Elles permettent également de caractériser d'autres zones d'intérêt scientifique particulier telles que les régions polaires. Les scientifiques ont d'ailleurs enregistré une plus grande diversité d'espèces vivant sous les tropiques et une diminution progressive de cette diversité vers les pôles.** Néanmoins, les régions polaires sont des habitats riches pour des populations planctoniques spécifiquement adaptées dont les interactions semblent être beaucoup plus intenses.

Les régions de remontées d'eaux riches en nutriments (upwelling) et les zones entourant certaines îles volcaniques sont également des zones d'intérêt scientifique particulier. En effet, ces eaux fertilisées contiennent certains des habitats les plus productifs de l'Océan et soutiennent les populations de poissons.

**Les chercheurs ont constaté que les courants océaniques peuvent également jouer un rôle majeur dans la distribution géographique des communautés planctoniques.** Ces phénomènes sont étudiés à l'échelle de bassins spécifiques. Par exemple, des études soulignent le rôle majeur du courant des Aiguilles dans la connectivité des communautés planctoniques dans l'Atlantique et le Pacifique. La composition d'une communauté planctonique dépend aussi fortement de la profondeur.

**En outre, des études ont révélé que le plancton, comme les bactéries, présente généralement une plus grande diversité dans l'océan profond, alors que les virus marins semblent être plus diversifiés vers la surface.** Parce que les bactéries et les virus marins jouent un rôle essentiel dans le contrôle des flux vitaux d'éléments nutritifs et d'énergie dans l'Océan, il est crucial de détailler leurs compositions afin de comprendre comment le fonctionnement des communautés planctoniques varie en réponse aux impacts du changement climatique.



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092867419311249>

Anomalies (changements) projetées de la diversité prédite d'ici la fin du XXIème siècle pour ces trois groupes, plus trois autres. Les couleurs rouges indiquent que la biodiversité de ces groupes augmentera ; les bleues qu'elle diminuera.  
© Federico Ibarbalz, Chris Bowler et Lucie Zinger



## Comprendre comment le plancton réagit au changement climatique dans les profondeurs de l'Océan

**Janaina Rigonato, microbiologiste brésilienne, a mené deux années de recherches post-doctorales au Genoscope, le Centre national de séquençage français, dans le cadre du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*.**

Ses travaux ont porté sur la composition du plancton présent bien en deçà de la surface océanique, mettant en lumière les communautés résidant dans les zones de minimum d'oxygène (ZMO). Ces régions anoxiques sous-marines augmentent sans cesse en taille et en nombre du fait des activités anthropiques, ce qui menace d'asphyxier de vastes étendues océaniques.

**«Les organismes marins, comme les poissons, ont besoin d'oxygène pour survivre: une augmentation des régions anoxiques réduit les habitats disponibles pour de nombreuses espèces marines, influence la composition des écosystèmes, peut entraîner la propagation d'un grand nombre d'algues toxiques, et même éradiquer la vie marine incapable de s'adapter ou de migrer.**

Entre 200 et 1 000 mètres sous la surface, la zone mésopélagique de l'Océan peut sembler froide, sombre et inhospitalière, pourtant ces eaux profondes regorgent de vie. Le plancton dans les profondeurs de l'Océan forme des écosystèmes hautement connectés, traversant les bassins continentaux par le biais des courants océaniques, remontant à la surface sous le couvert des ténèbres à la recherche de nourriture et contrôlant les processus qui transportent le carbone vers le plancher océanique.

La digestion, la respiration, les mouvements et les interactions planctoniques déterminent des cycles nutritifs essentiels, nourrissent le réseau trophique océanique et séquestrent de grandes quantités de carbone hors de l'atmosphère. La migration verticale diurne, par exemple, est le plus grand mouvement de créatures de la nature, impliquant un grand nombre d'organismes zooplanctoniques, entre autres. Son ampleur, sa majestuosité et sa complexité sont absolument étonnantes. Cependant, la connectivité des communautés planctoniques de l'océan profond expose également ces organismes aux impacts anthropiques. On sait très peu de choses sur le plancton dans les profondeurs mystérieuses de l'Océan et sur la manière dont il réagit à ces menaces», explique Janaina Rigonato.



## Évaluer les conséquences des activités anthropiques sur les communautés planctoniques

Les effets du changement climatique, de l'acidification des eaux, des pollutions, notamment plastiques, de la surpêche et autres conséquences des activités humaines ont généré une pression sans précédent sur l'Océan.

**Il est établi par les scientifiques que de nombreuses communautés planctoniques changeront en raison du réchauffement de l'Océan.**

Des études basées sur les projections climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) suggèrent qu'un réchauffement important de l'Océan pourrait conduire à une tropicalisation des communautés planctoniques aux hautes latitudes. Ces questions ont été soulevées en détail dans la publication *World Scientists' Warning to Humanity: microorganisms and climate change*.

Les espèces et communautés planctoniques spécifiquement adaptées à la vie dans les régions polaires et dans d'autres habitats d'intérêt scientifique particulier pourraient être modifiées et ressembler davantage à celles qui se trouvent plus près de l'Équateur. Cela pourrait avoir des conséquences sur les écosystèmes marins dont l'ampleur est encore difficile à mesurer.

Le consortium *Tara Oceans* étudie comment les communautés microbiennes pourraient s'adapter à des perturbations sans précédent dans l'Océan. Par exemple, les études menées sur certaines espèces de plancton présentes presque partout dans l'Océan aident les chercheurs à comprendre la résilience de certaines communautés face au réchauffement des eaux et leur capacité génétique à s'adapter au changement. En intégrant des données génétiques, morphologiques et écologiques, les modèles peuvent prédire dans quelle mesure les contributions aux services écosystémiques essentiels pourront changer.

**L'analyse des communautés planctoniques permet de mieux comprendre la santé mondiale de l'Océan, tout comme les communautés microbiennes dans l'intestin renseignent sur la santé humaine.**



## Trois niveaux d'analyse génomique du plancton

### Métabarcoding

Des séquences d'ADN spécifiques sont ciblées : de véritables « codes barres » génétiques propres à chaque espèce. Le séquençage d'un échantillon dans son intégralité permet alors d'identifier les espèces présentes et de dresser ainsi un portrait de toute la communauté microbienne.

### Métagénomique

Au lieu de regarder différents microorganismes, la métagénomique identifie l'ensemble des gènes présents dans l'échantillon, comme si le microbiome était un seul être vivant avec un seul génome. Les gènes identifiés fournissent ensuite des informations précieuses sur les organismes présents, ainsi que sur leurs fonctions.

### Méatranscriptomique

Ce domaine d'étude complète la précédente technique et concerne cette fois, l'ensemble des ARN issus de la transcription des gènes exprimés lors de la collecte de l'échantillon.

Alors que la métagénomique dessine un potentiel génétique de la communauté microbienne, la méatranscriptomique examine comment ce potentiel est exprimé dans un environnement donné.

« Mon projet portait sur les caractéristiques écologiques du plancton, y compris les virus, les bactéries, les archées et les petits eucaryotes qui vivent dans ces mystérieuses profondeurs océaniques. ». Nous avons constaté que les communautés planctoniques de l'océan profond réagissent différemment aux impacts environnementaux, tels que les changements de température et les faibles niveaux d'oxygène, que celles vivant près de la surface. Nos études ont également mis en évidence des communautés microbiennes dans les profondeurs de l'Océan qui sont fortement associées à une faible concentration en oxygène, ce qui fournit des informations sur les types d'espèces présentes dans les zones désoxygénées, leurs fonctions et comment elles se sont adaptées à ces conditions extraordinaires. **Ce travail fournit une base de référence pouvant être utilisée pour identifier et en apprendre davantage sur les zones de minimum d'oxygène, comprendre leurs principaux moteurs et développer des stratégies pour traiter leurs causes.** » explique Janaina.

Pour comprendre les données recueillies sur plus de 200 sites océaniques mondiaux au cours du périple de *Tara*, Janaina a utilisé un éventail d'outils bioinformatiques et informatiques.

« Cela m'a ouvert un monde nouveau. L'un des aspects les plus enrichissants du projet a été de faire de la science dans un esprit interdisciplinaire et panocéanique. Comparé à l'Atlantique Nord, on connaît relativement peu de choses sur l'Atlantique Sud. Il est essentiel que nous continuions à combler le manque de connaissances le plus rapidement possible. Le Brésil a environ 7 500 kilomètres de côtes et sans une compréhension de base du plancton vivant dans ces eaux, nous ne connaissons tout simplement pas l'ampleur des dommages causés par le changement climatique, la pollution et les forages pétroliers et gaziers. Cela a été motivant de voir les projets mondiaux impliquant des chercheurs brésiliens que l'expédition *Tara Oceans* a inspirés. Par exemple, l'Université fédérale de Santa Catarina à Florianópolis a construit un navire de recherche inspiré de cette expédition qui depuis trois ans est en train d'adopter les mêmes équipements et normes.

La recherche océanique coûte cher et les scientifiques ont besoin d'obtenir le soutien du public. C'est un grand défi d'impliquer les gens du monde entier dans des discussions sur le travail que nous faisons et ses implications. En apprendre davantage sur le plancton peut aider l'humanité à développer une relation plus durable avec l'Océan. **Je ne cesse de m'étonner du fait que, même dans les milieux les plus extrêmes, par exemple, lorsque les niveaux d'oxygène sont si bas que l'Océan est hostile à d'autres formes de vie, les microorganismes jouent un rôle crucial dans la modulation de leur environnement.** Si nous parvenons à impliquer les gens sur cette question et à obtenir leur soutien concernant le travail que nous accomplissons, notre science aura un impact bien plus important ».





## Mieux comprendre le fonctionnement de la pompe à carbone océanique

Une étude basée sur les données *Tara Oceans* combinant les données environnementales avec les informations génétiques provenant des communautés planctoniques a mis en valeur de manière frappante le rôle clé du plancton dans la pompe à carbone océanique. Celle-ci a identifié près de 50 gènes spécifiques de bactéries et de virus océaniques susceptibles d'indiquer les flux de carbone vers les régions océaniques profondes, en se basant sur les communautés planctoniques présentes dans les couches de surface.

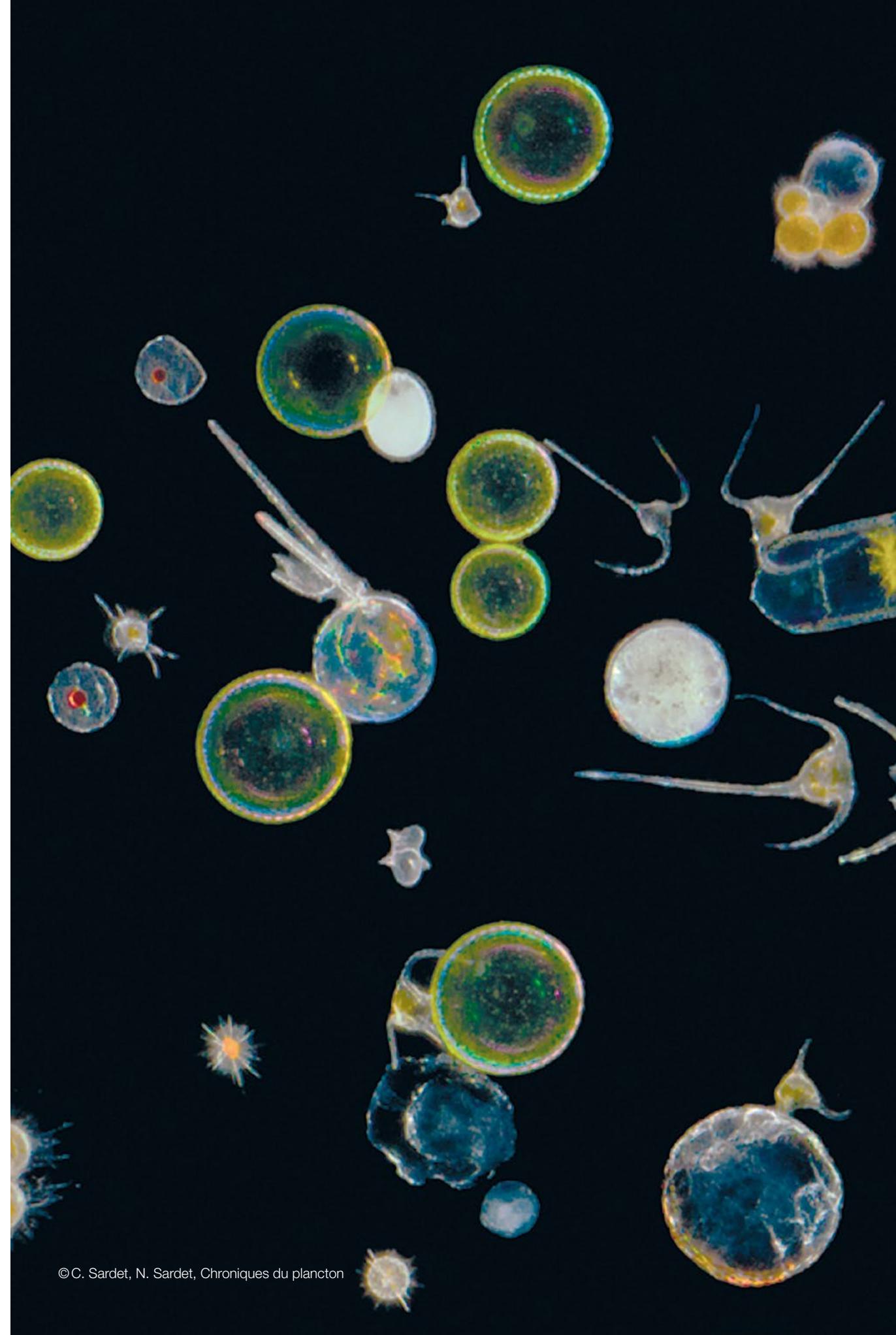
Bien que la fonction exacte de certains gènes demeure inconnue, d'autres études montrent également le rôle important des virus marins dans la pompe à carbone. Ceux-ci influencent à la fois le cycle de vie de leurs hôtes mais aussi, dans certains cas, la manière dont le plancton, des bactéries aux eucaryotes, effectue la photosynthèse ou utilise des nutriments clés tels que le carbone, le soufre et l'azote. **La communauté scientifique s'accorde à penser que la composition des virus marins a un impact significatif sur la quantité de carbone transféré par le plancton dans les profondeurs de l'Océan.**

La quantité de carbone est séquestrée et transférée dans les profondeurs de l'Océan par des espèces ou des communautés planctoniques spécifiques n'est pas encore connue. Les études ont mis en évidence des résultats surprenants dans ce domaine également. Notamment, **les diatomées, que de nombreux chercheurs supposaient trop petites pour intervenir dans la pompe à carbone, se sont avérées jouer un rôle majeur dans le transfert du carbone vers le plancher océanique.**



**Les études biologiques basées sur les données *Tara Oceans* ont mis en évidence les rôles précédemment méconnus des organismes et des communautés planctoniques dans la fonction des écosystèmes :**

- Au niveau planétaire, les scientifiques de *Tara Oceans* ont observé un gradient mondial des espèces planctoniques entre l'équateur et les pôles, avec une plus grande diversité d'espèces dans l'océan tropical et une diminution progressive vers les pôles.
- Ils ont montré que la quantité de neige marine tombant vers l'océan profond est corrélée à la composition de la communauté planctonique des eaux de surface. La quantité de particules de carbone présente 150 mètres sous la surface peut être prédite à partir de l'abondance de 51 gènes viraux et bactériens trouvés à la surface.
- Les chercheurs ont observé un large éventail de symbioses surprenantes se produisant entre les espèces planctoniques, une flore et une faune de plus grande taille et le milieu océanique, contrôlant des composants fondamentaux de la pompe à carbone.
- Parmi les plus petites espèces planctoniques, certaines ont de remarquables rôles méconnus, comme la diatomée *Minidiscus*, 500 fois plus petite qu'un grain de sable, qui joue un rôle significatif dans le transfert du carbone vers l'océan profond au cours de son cycle de vie.
- Certaines études ont fourni des informations importantes sur la manière dont l'efficacité d'absorption du carbone par le plancton peut être affectée par les virus présents dans l'eau.
- Les chercheurs comprennent désormais mieux comment le zooplancton transfère d'importantes quantités d'énergie, de nutriments et de biomasse dans la direction opposée, des profondeurs océaniques vers la surface.



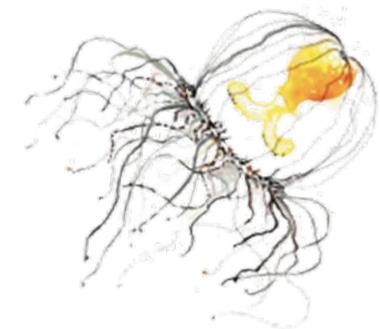
## Le programme *Tara Pacific* : dévoiler la complexité microscopique des récifs

L'expédition *Tara Pacific (2016-2018)* a sillonné pendant deux ans le Pacifique afin de mieux comprendre comment les récifs coralliens et le plancton, qui vit en leur sein et autour d'eux, façonnent les écosystèmes océaniques. L'expédition, qui faisait partie du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*, a fourni un trésor de données que les chercheurs et chercheuses exploitent pour étudier la diversité des colonies coralliennes et leurs réponses aux changements climatiques et environnementaux. Au cours de son périple, **la goélette scientifique Tara a traversé 11 fuseaux horaires, prélevant près de 58 000 échantillons de coraux, de plancton, d'eau de mer, de poissons et de particules d'air.**

Les coraux sont des colonies d'animaux au corps souple en forme de tubes, semblables à de petites anémones, qui construisent à leur base un exosquelette calcaire. Individuellement, ils semblent donc plutôt petits, mais au sein de colonies pouvant atteindre un million de polypes, l'accumulation de ces squelettes crée d'immenses cités coralliennes. Les récifs coralliens couvrent moins de 0,2% de la surface de l'Océan. Sur une surface si infime, ils abritent plus de 30% des espèces marines connues à ce jour. Sur un kilomètre carré de récifs coralliens se trouve autant de biodiversité macroscopique que dans l'ensemble de la France métropolitaine.

La Grande Barrière de corail, à elle seule, mesure plus de 3000 kilomètres de long. Pourtant, **en raison des perturbations anthropiques telles que le changement climatique, l'acidification de l'Océan et la pollution, certains des remarquables architectes océaniques à l'origine de ces formations sont menacés d'extinction.**

Le Pacifique est le plus grand bassin océanique sur Terre, s'étendant de la côte ouest des Amériques à la Chine et au-delà. Il couvre plus de 150 millions de km<sup>2</sup>, abrite la fosse la plus profonde de la planète, les îles les plus reculées, ainsi qu'une part significative des récifs coralliens du monde. Pourtant, la majorité de ces incroyables habitats reste non répertoriée, inexplorée et inconnue. L'expédition *Tara Pacific* était dédiée à l'exploration de la diversité cachée des récifs coralliens du Pacifique pour permettre aux scientifiques d'étudier la capacité des coraux à s'adapter au changement climatique. Les coordinateurs scientifiques de l'expédition, Denis Allemand (Centre Scientifique de Monaco), et Serge Planes (Directeur de recherche Centre national de la recherche scientifique (CNRS) explique les enjeux de *Tara Pacific*.





## Denis Allemand et Serge Planes

### Quels sont les principaux objectifs de l'expédition Tara Pacific ?

« Bien qu'ils ne couvrent que 0,2 % du plancher océanique, les récifs coralliens abritent plus d'un quart, probablement près d'un tiers, de la diversité des espèces océaniques. Sans eux, la situation de l'humanité serait infiniment plus dramatique. Les récifs fournissent des habitats pour les espèces, soutiennent les pêches et offrent aux sociétés humaines un large éventail d'autres avantages. Cela comprend la protection des côtes contre les fortes houles et les cyclones, des opportunités liées au tourisme, ainsi que de la nourriture et des emplois pour au moins un demi-milliard de personnes dans le monde, sans compter un nombre considérable d'avantages secondaires.

Ainsi, les récifs coralliens représentent une priorité en matière de conservation. Afin de les protéger, nous devons en apprendre bien plus sur eux. Il existe un grand nombre de facteurs biologiques, chimiques et physiques en lien avec la vulnérabilité ou la résilience des espèces coralliennes qui nous sont inconnus. Par exemple, chaque centimètre de la surface des récifs coralliens abrite des millions d'organismes planctoniques. Les perturbations du microbiome entourant les coraux et les eaux environnantes peuvent dès lors déstabiliser des symbioses essentielles et déséquilibrer les systèmes naturels. Si nous en apprenons plus sur ces processus, nous serons plus à même de protéger les récifs coralliens. Cela ne signifie pas que nous devons attendre avant d'agir car il existe des preuves manifestes de la disparition de nombreuses espèces coralliennes dans le monde à mesure que l'Océan se réchauffe et devient plus acide. Néanmoins en approfondissant notre compréhension de ces incroyables habitats, nous pouvons développer un plan d'action plus approprié. » explique Serge Planes.

« La santé du corail ne concerne pas seulement les animaux eux-mêmes, mais également les microbes vivant sur, dans et autour d'eux. Notre objectif principal est d'étudier les connexions et

les interactions entre le corail et ces multitudes d'organismes. Les coraux sont des holobiontes. Cela signifie qu'ils hébergent et interagissent avec un large éventail de microorganismes tels que des bactéries, des virus, des microalgues, des protistes et des champignons, susceptibles de jouer un rôle clé dans leur métabolisme, leur immunité et leur tolérance au stress. L'expédition *Tara Pacific* a pour objectif d'identifier ces interactions et comment elles peuvent être affectées par le changement climatique, l'acidification de l'Océan et la pollution.

Un exemple bien connu est que les coraux dépendent d'un partenariat avec des algues, les zooxanthelles, vivant à l'intérieur de leurs cellules. Des eaux plus chaudes peuvent contraindre certains coraux à expulser ces algues symbiotiques, se privant par là même de nutriments et éventuellement se condamnant à mourir de faim. Ils sont également confrontés à une multitude d'autres défis : par exemple, environ un tiers des émissions de carbone produites par l'Homme est directement dissous dans l'Océan, ce qui rend les eaux plus acides. L'acidification de l'Océan peut réduire les minéraux disponibles, nécessaires aux coraux pour construire leurs exosquelettes, affaiblissant ainsi leurs structures et les rendant vulnérables aux ouragans, aux prédateurs, à la navigation et aux agents pathogènes. Nous avons collecté un grand nombre de données sur le plancton vivant au sein et autour des récifs et à l'intérieur des branches de corail, à travers le Pacifique. Combinées à un large éventail d'autres observations océaniques à l'échelle planétaire, ces données uniques aideront les scientifiques à répondre à des questions théoriques et écologiques majeures sur les récifs coralliens, depuis les molécules, les gènes, les cellules jusqu'aux écosystèmes. Ensemble, ces données nous permettront de déterminer quels facteurs supportent au mieux la santé du corail dans son environnement. » explique Denis Allemand.

### Qu'avez-vous appris jusqu'à présent ?

« Il est bien connu que le changement climatique est un facteur majeur dans le blanchissement de nombreux récifs coralliens dans le monde. Beaucoup disparaissent à une vitesse vraiment alarmante. On observe cependant sur certains sites des changements dans la diversité des structures des récifs coralliens. Il existe plus de 1500 espèces de coraux décrites et leurs squelettes sont de toutes formes et tailles. Les coraux massifs, en forme de rocher, semblent généralement plus résistants que ceux plus petits et ramifiés. Pour certains récifs, les perspectives semblent être un changement graduel, mais continu, de la diversité et de la forme de leur structure. Ils deviennent plus uniformes et cela menace également la faune qui fait partie intégrante de cette diversité, des crustacés et mollusques aux organismes plus gros tels que les poissons qui s'en nourrissent.

À titre d'exemple, lors de l'expédition *Tara Pacific*, la goélette a fait escale à Clipperton, un atoll corallien inhabité dans le Pacifique Est. Un récif étonnant tapisse la quasi-totalité des fonds marins environnants et supporte une incroyable explosion de vie marine. Cependant, cette métropole corallienne n'est construite que par 12 espèces différentes de coraux. Si seulement 2 ou 3 d'entre elles venaient à mourir, ce n'est pas uniquement une partie essentielle du corail qui disparaîtrait, mais c'est le système tout entier qui serait confronté à une menace majeure. Il est important de surveiller les récifs coralliens et de chercher à comprendre comment les menaces environne-

mentales et les efforts de protection affectent ces habitats afin que nous puissions ajuster nos actions et assurer leur survie à l'avenir. » explique Serge Planes.

« Il y a 150 ans, très peu de choses étaient connues sur la physiologie et la médecine. Il suffit de regarder la vitesse à laquelle les vaccins ont été développés pendant la pandémie de Covid-19 pour voir le chemin parcouru. Cela n'a été possible que grâce à la connaissance des processus physiologiques chez l'être humain accumulée depuis l'époque de Claude Bernard, fondateur de la médecine expérimentale. De même, il y a quelques décennies à peine, on en savait relativement peu sur les récifs coralliens et l'importance de leurs contributions au sein des écosystèmes océaniques. Nous ne pouvons pas sauver les récifs coralliens si nous ne connaissons pas la physiologie et biologie de base de ces animaux. Heureusement, les scientifiques font actuellement de grands progrès. La recherche associée à l'expédition *Tara Pacific* contribue considérablement à notre compréhension de la biologie fondamentale des récifs coralliens et de leurs rôles au sein de leur environnement. On dit souvent que les récifs sont des oasis dans les déserts océaniques, c'est ce qu'on appelle le paradoxe de Darwin mais on sait peu de choses sur la manière dont le récif interagit avec le reste de l'Océan. En se basant sur les données recueillies au cours de l'expédition, les scientifiques abordent désormais d'importantes questions telles que l'impact des facteurs de stress anthropiques sur les récifs situés loin de toute présence humaine. » explique Denis Allemand.



Quelle est la capacité des coraux à résister et à s'adapter au changement climatique ? Quelle est la diversité des habitats récifaux aux niveaux microscopique et macroscopique ?

Les scientifiques abordent également des questions plus larges : par exemple, les télomères (régions hautement répétitives d'ADN à l'extrémité d'un chromosome) chez le corail ressemblent de façon frappante à notre propre code génétique. Ils pourraient contribuer à comprendre le processus de vieillissement chez l'Homme, d'autant plus que les coraux sont capables de vivre pendant des milliers d'années.

#### De quelles autres manières l'expédition *Tara Pacific* a-t-elle eu un impact ?

«Ce qui rend les données *Tara Pacific* si robustes, c'est l'utilisation des mêmes protocoles tout au long de l'expédition. Les données sont ainsi entièrement comparables. Par exemple, dans chaque échantillon se trouvent des milliards de molécules provenant de toutes sortes d'organismes et de leurs interactions. En étudiant cette «soupe» d'ADN environnemental, nous pouvons en apprendre beaucoup sur ce qui se passe dans l'Océan. Dans ce contexte, il est important de prédéfinir le sujet des études menées et de développer des normes mondiales pouvant rendre compte de la grande variété de manières dont ces organismes libèrent leur ADN dans le milieu marin. Les coraux et les éponges, par exemple, sécrètent beaucoup plus de mucus que d'autres animaux tels que les poissons. Aussi, collecter beaucoup d'ADN corallien ne signifie pas nécessairement qu'ils ont envahi l'écosystème ! Il est désormais possible d'analyser l'ensemble du Pacifique et d'étudier ces actions depuis l'océan profond jusqu'à la surface. Cela n'avait jamais été réalisé auparavant à cette échelle.» s'enthousiasme Serge Planes.

«Pour moi, cela a été une aventure fantastique de travailler avec une équipe aussi incroyable, compétente et sympathique. Certains membres d'équipage sont spécialisés dans la science et d'autres plus dans la voile, mais comme *Tara* est un navire de recherche relativement compact, tout le monde participe et collabore. Cela crée une atmosphère fantastique à bord. L'équipage de la goélette entre vraiment en contact avec les gens : nous avons eu la visite du grand public, de politiques, d'enseignants et d'écoliers, qui se sont joints à nous lors des escales. Cela créait une véritable effervescence pour tout le monde. **La Fondation Tara Océan fournit une excellente plateforme pour communiquer sur l'importance des récifs coralliens et du travail scientifique que nous effectuons, ainsi que pour mieux comprendre ce que l'Océan représente pour les populations locales.** *Tara Pacific* peut être comparée à la mission de Charles Darwin sur le *Beagle* de 1831 à 1836 qui a conduit à la découverte de la formation des récifs et des mécanismes de l'évolution du monde vivant. En étudiant l'Océan, on n'est jamais loin d'étudier la vie !» explique Denis Allemand.

Les récifs coralliens, déjà connus pour leur richesse en faune marine, abritent également la plus grande diversité microbienne de la Terre, selon les travaux publiés par Pierre Galand de l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer et ses collaborateurs de *Tara Pacific*. Par une analyse moléculaire de chacun de ces échantillons, les auteurs ont analysé spécifiquement les microbes (bactéries, virus, archées) présents dans l'échantillon.

**Les auteurs ont alors eu la surprise d'identifier un peu plus d'un demi-million de séquences d'origine bactérienne, une valeur étonnante puisqu'elle représente 20% de la communauté bactérienne connue sur Terre ! Ainsi, la biodiversité des récifs va de pair avec sa biodiversité en termes de microbes.** Cette riche population bactérienne pourrait aider les récifs à mieux résister aux vagues de chaleur, à la pollution, à la turbidité et à d'autres facteurs de stress, jouant ainsi le rôle d'assurance écologique. Certaines bactéries présentes sur les coraux sont bénéfiques, par exemple en fournissant de la vitamine B à leurs hôtes, et leur diversité suggère que certains microbes utiles sont susceptibles de survivre à une agression environnementale particulière et de continuer à soutenir le corail.





**DÉPART | FIN**  
28 MAI 2016 | 27 OCT. 2018

Lorient  
BRETAGNE



- sites d'échantillonnage
- escales de sensibilisation
- pas de permis d'échantillonnage



Partie

# POUR UNE SCIENCE OUVERTE

coopération internationale et dialogue politique

## Soutenir les collaborations scientifiques

et le renforcement des capacités

Faire de la science sur l'univers invisible et mobile du plancton offre une occasion unique de dépasser les frontières et de réunir des chercheurs et chercheuses de tous les domaines, cultures et continents. Ceci est d'autant plus important que la crise écologique et climatique nécessite aujourd'hui un effort de coopération scientifique planétaire, notamment pour protéger l'Océan qui est un écosystème intégré sans frontières.

Mais avec le développement récent de nouvelles technologies, notamment la génomique et la gestion des données massives, le coût des infrastructures scientifiques pour répondre à ces besoins a considérablement augmenté. Les inégalités d'accès aux formations et infrastructures scientifiques se creusent ainsi à nouveau entre les pays en matière de sciences marines, notamment dans les pays en développement. Il est pourtant indispensable que chaque pays dispose d'une expertise scientifique nationale, à la fois pour son implication dans les négociations internationales mais également pour des prises de décision sur la gestion des écosystèmes au niveau local.

Lors des négociations relatives à la biodiversité marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale (BBNJ), les représentants d'Afrique et des petits États insulaires ont exprimé comme prioritaires leurs besoins en termes de formations de jeunes chercheurs et chercheuses, d'accès aux infrastructures de recherche, de transfert de technologies, d'accès aux données et enfin, d'intégration aux réseaux de recherche régionaux et internationaux.

Pour la Fondation Tara Océan, il est impératif de partager le plus largement possible les bases de données et les connaissances acquises avec la communauté scientifique internationale, en soutenant les institutions scientifiques des pays en développement et en stimulant des coopérations internationales concrètes autour de ses expéditions scientifiques.

Le projet a mis en évidence les avantages de réunir des scientifiques du monde entier sur des projets de recherche collaboratifs. Il a facilité l'échange d'expertises entre des biologistes moléculaires, océanographes, généticiens et modélisateurs de pays actuellement sous-représentés dans la recherche océanographique mondiale, tout en intégrant le savoir, les besoins et les défis locaux. Un fort esprit de réciprocité a été au cœur du projet, les chercheurs et chercheuses ont reçu une formation et des opportunités de développer leurs réseaux, tandis que les groupes de recherche avec lesquels ils ont collaboré ont bénéficié de leurs expériences de terrain, et connaissances uniques sur les défis liés à l'Océan rencontrés dans leurs pays. Leurs recherches ont permis des avancées scientifiques pour la compréhension de la biodiversité planctonique et des fonctions et évolutions de ces écosystèmes. Ils ont été également encouragés à partager des idées de projets de recherche et à explorer des pistes pour de futures collaborations. Ce projet a contribué à créer des réseaux de recherche dans des pays comme le Chili, le Brésil et le Sénégal.

Une autre priorité du projet a été d'encourager les chercheurs et chercheuses de tous les domaines scientifiques et de tous les continents à développer et à suivre des protocoles normalisés lors des missions océanographiques pour permettre le partage des données et les résultats de leurs analyses entre les disciplines et les pays.



ACCÈS AUX DONNÉES, FORMATIONS ET TRANSFERT DE TECHNOLOGIES VERS LES PAYS DU SUD



## Lars Stemmann

Lars Stemmann est professeur à Sorbonne université (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-LOV) et a été coordinateur scientifique lors de l'expédition *Tara Oceans*. Au cours du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*, il a supervisé le travail de deux jeunes chercheurs : le doctorant océanographe togolais Yawouvi Dodji Soviadan et le postdoctorant modélisateur sénégalais Baye Cheikh Mbaye. De cette expérience, Lars souhaiterait que davantage de chercheurs de pays sous-représentés dans la recherche océanique participent à l'effort mondial visant à mieux comprendre les fonctions du plancton dans les écosystèmes océaniques, de l'échelle locale à globale, mais aussi à comprendre comment leurs habitats peuvent être protégés.

« Travailler avec ces chercheurs a été l'occasion d'échanges enrichissants », dit-il fièrement, en soulignant le succès des recherches menées par Yawouvi Dodji Soviadan et Baye Cheikh

Mbaye. Mon groupe de recherche utilise une combinaison de théories, d'observations et de modèles mathématiques pour étudier l'impact des changements globaux sur la composition des communautés planctoniques et la répartition des tailles du plancton. Les études menées par Yawouvi et Baye ont mis en lumière le rôle du plancton dans le recrutement des poissons et le transfert du carbone vers les profondeurs océaniques. Ces résultats permettent même de prévoir les ressources planctoniques et halieutiques à l'échelle mondiale. C'est un immense succès.

Les étudiants impliqués dans le projet se sont également réunis pour partager leurs expertises et développer des collaborations. « Il a été vraiment intéressant de travailler avec des chercheurs dans leur pays d'origine pour traduire notre connaissance de processus écosystémiques complexes en quelque chose de compréhensible pour tous. » dit-il.

Des déplacements ont été organisés avec Lars, Dodji, Baye et l'équipe de la Fondation Tara Océan, ils ont permis de s'entretenir avec des décideurs politiques au Togo et au Sénégal pour les sensibiliser à l'importance de la recherche.

« Il y a encore beaucoup à apprendre sur le plancton dans l'Océan, mais c'est très excitant ! Mon groupe de recherche rassemble et analyse des données d'observations sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques de l'Océan pour en tirer de nouvelles connaissances sur l'impact du changement climatique sur les fonctions des communautés planctoniques et les services écosystémiques qu'elles fournissent. Nous utilisons de minuscules caméras sous-marines pouvant prendre des images instantanées de la biodiversité planctonique. Une autre méthode consiste à agréger des données physiques, chimiques et biologiques pour créer des modèles prédictifs. Dans le cadre du projet, les chercheurs ont construit un modèle utilisé pour prédire la quantité de plancton présente dans les eaux océaniques et celle disponible pour les poissons en fonction de la répartition des tailles des proies et des prédateurs. Ces travaux ont également ouvert la voie à des projets de sui-

vi, nous voulons appliquer ce modèle global au niveau régional afin de prédire les relations entre le plancton, les poissons et les pêches dans l'Atlantique intertropical. Il est également prévu de développer une plateforme d'imagerie à Dakar. Le programme Tara Oceans a mis en évidence notre faculté à analyser des jeux de données génomiques ou d'imagerie très complexes. Notre objectif est désormais de former d'autres membres de la communauté scientifique à appliquer les mêmes protocoles dans différentes parties de l'Océan. Il existe encore d'importantes lacunes dans nos observations que nous devons combler : par exemple, la collecte de données en séries temporelles est nécessaire pour rendre compte de la manière dont les communautés planctoniques évoluent au fil des jours, des semaines, des mois, des saisons, des années et des décennies. Combler ces lacunes requiert de mobiliser des chercheurs du monde entier, et c'est pourquoi ce projet et le soutien du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) sont si importants. Cela peut avoir un réel impact sur la recherche océanique mondiale et des applications régionales telles que celles que nous voulons construire pour l'Atlantique Est intertropical. »



Malgré leurs rôles essentiels dans la conduite des processus naturels vitaux, les impacts potentiels des changements environnementaux sur les communautés planctoniques sont rarement mentionnés dans les documents politiques.

**Au cours du projet *Plancton océanique Climat et Développement*, la Fondation Tara Océan a instauré un dialogue innovant au sein de la communauté scientifique afin d'identifier comment la science de haut niveau peut être portée dans la sphère politique.** L'objectif étant d'inciter les dirigeants à prendre des décisions importantes en faveur de l'Océan et à maintenir des objectifs ambitieux.

Étudier le plancton selon l'approche holistique du programme *Tara Oceans* présente des opportunités extraordinaires. En effet, cela permet de guider les stratégies de protection marine et d'utilisation durable des ressources, fournir des informations détaillées aux modèles climatiques, prédire de potentiels changements et comprendre comment l'Océan, en retour, est susceptible d'aider l'humanité à atténuer ou s'adapter au changement climatique.

#### Certains domaines ont été identifiés comme prioritaires :

- comprendre les impacts cumulatifs du changement climatique sur la vie marine ;
- développer une nouvelle génération d'outils d'observation et de cartographie de l'Océan ;
- faire évoluer les modèles halieutiques vers des modèles qui intègrent l'ensemble des écosystèmes ;
- faire évoluer le suivi de l'état de santé de l'Océan d'un suivi qualitatif (absence/présence d'espèces clés) vers un suivi plus quantitatif, prédictif spatialement (par la combinaison de la génomique et de l'imagerie satellitaire) et de manière écosystémique.

**Dans le même temps, afin d'élaborer des politiques basées sur la science, il est nécessaire de veiller à ce que la recherche bénéficie des compétences et de la contribution des scientifiques, des instituts et des infrastructures de recherche actuellement sous-représentés, en particulier dans les pays du Sud.**

L'étude des écosystèmes planctoniques cruciaux pour la vie et les moyens de subsistance dans le monde est essentielle pour générer des connaissances et permettre le passage à l'action politique aux niveaux local, régional et international.

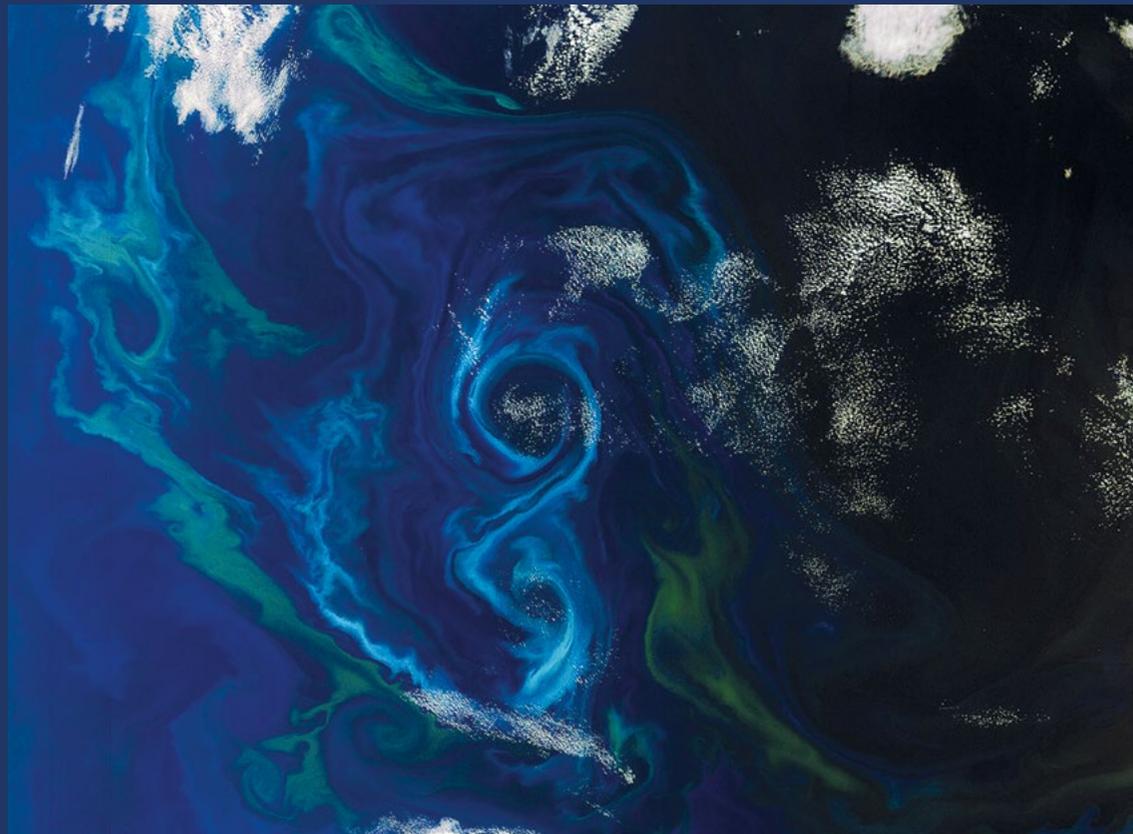
Le projet a également permis **le développement de méthodologies et méthodes de suivi et de prévision basées sur la connaissance intégrée des écosystèmes planctoniques dans l'objectif d'améliorer la gestion de la pêche, d'identifier des régions océaniques nécessitant une protection et de guider les actions de lutte contre le changement climatique.**

## Les zones planctoniques clés de l'Océan : identifier, prédire et surveiller

En se basant sur les résultats du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*, la Fondation Tara Océan continuera à faciliter les interactions entre chercheurs et chercheuses et décideurs politiques dans le cadre du développement d'une nouvelle méthodologie. Celle-ci consiste à identifier l'intensité des fonctions et services écosystémiques essentiels fournis par le plancton en établissant une corrélation entre les données satellitaires et les données génomiques (issues de l'expression de gènes d'organismes planctoniques) correspondant à des fonctions clés (production primaire, export de carbone, etc.). Il s'agit d'avoir la capacité de cartographier les activités fonctionnelles du plancton à partir de l'imagerie satellitaire. **L'objectif est d'identifier les zones où l'intensité de ces services écosystémiques du plancton est forte et donc d'identifier les endroits d'intérêt, notamment climatique, dans l'Océan : the Key Ocean Planktonic Areas (KOPAs).**

La fondation a pour ambition que cette méthodologie d'identification de zones clés aide les décideurs politiques à relier les impacts des changements mondiaux aux défis écologiques et économiques aux niveaux local et régional. En effet, les aires marines protégées et les outils de gestion par zone sont des moyens essentiels pour réduire la perte de biodiversité au niveau international et protéger les espèces et les habitats clés.

Ces travaux sont d'autant plus importants qu'avec l'adoption du Traité pour la biodiversité au-delà de la juridiction nationale (BBNJ), différents outils de gestion par zone seront discutés et proposés et en priorité les aires marines protégées. Plus ailleurs, il s'agira dans le cadre de ce traité de proposer des formats adaptés pour les différentes zones en haute mer et également dans les zones hybrides, situées à la fois dans les zones économiques exclusives et en haute mer. Dans certains cas, des zones pourront être choisies pour des actions de monitoring scientifique plus précis, visant à mieux prédire les changements en cours dans ces zones.



## Renforcer la coopération avec le Chili : le projet CEODOS

Au cours du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*, une solide coopération s'est structurée entre le consortium *Tara Oceans* et la communauté scientifique chilienne. Le projet a joué un rôle particulier dans ce rapprochement avec le financement de deux jeunes chercheurs chiliens qui ont travaillé pendant plus de deux ans dans les laboratoires associés à la Fondation Tara Océan. La proposition de développer la méthodologie Key Ocean Planktonic Areas (KOPAs), précédemment décrite, est notamment née de la collaboration entre un groupe de chercheurs et chercheuses *Tara Oceans* spécialisé dans la modélisation et la bioinformatique et le Centre de modélisation mathématique de l'Université du Chili.

Ces liens se sont renforcés avec la tenue d'un grand atelier scientifique à Concepción (Chili) en 2017 soutenu par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, ainsi que plusieurs manifestations de coopération associant science et gouvernance. Dans le processus de définition de la *Mission Tara Microbiomes (2021-2022)*, ces collaborations scientifiques préexistantes ont été décisives dans le choix du Chili comme l'une des régions prioritaires de la mission.

Le projet CEODOS, chapitre chilien de la *Mission Tara Microbiomes*, est largement axé sur la coopération mise en place dans le cadre du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*. Impliquant huit universités chiliennes et des centres de recherche, CEODOS a été soutenu par le ministre des Sciences. Plus généralement, grâce à CEODOS plusieurs centres de recherche chiliens sont désormais parties intégrantes de la communauté scientifique *Tara Oceans* dont l'approche holistique sera appliquée à l'étude de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes marins au large du Chili. Les travaux scientifiques permettront de guider les décisions politiques chiliennes au niveau national, mais aussi de prendre des positions communes avec la fondation lors de conférences internationales.

Pour en savoir plus sur le projet CEODOS: [www.ceodoschile.cl/](http://www.ceodoschile.cl/)

## OBSERVATION DE L'OCÉAN : DU CATALOGUE DES GÉNOMES DANS L'OCÉAN À UNE CARTOGRAPHIE GLOBALE DU PLANCTON



### Olivier Jaillon

Les paysages tels que les forêts tropicales, les savanes, les prairies, les déserts et la toundra arctique peuvent être généralement classés grâce à des caractéristiques comme le climat et la couverture végétale. Mais qu'en est-il de l'Océan ? Il est un espace tridimensionnel hautement dynamique d'une taille et d'une complexité immenses au sein de laquelle des facteurs tels que la latitude, la profondeur, l'élévation, la température et les courants peuvent créer des frontières naturelles qui sont invisibles à nos yeux mais structurent les écosystèmes. Certains chercheurs et chercheuses ont pour objectif de caractériser ces frontières sur des nouvelles cartes. Des études utilisant les données de l'expédition *Tara Oceans* ont mis en lumière des « provinces génomiques » qui abritent des communautés planctoniques génétiquement distinctes. Olivier Jaillon, chercheur au Genoscope, a accueilli la postdoctorante brésilienne Janaina Rigonato dans son équipe dans le cadre du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*.

#### Que sont les « provinces génomiques » du plancton océanique ?

« Au cours de l'expédition, d'importantes quantités de données métagénomiques ont été collectées dans l'Océan, offrant aux scientifiques la formidable opportunité d'en apprendre davantage sur le rôle que jouent les communautés planctoniques dans leurs écosystèmes. En comparant des échantillons séparés par des milliers de kilomètres et en intégrant ces informations aux données environnementales et satellitaires, notre recherche a révélé des tendances fascinantes dans la répartition mondiale du plancton. La métagénomique consiste à extraire tout l'ADN d'un échantillon d'eau donné, à le découper en petits fragments et à le séquencer. Il permet aux chercheurs et chercheuses de classer la composition des communautés microbiennes et de déterminer les fonctions du plancton qui y vit en recherchant

des gènes pouvant être associés, par exemple, à la production primaire ou à la pompe à carbone. Nous avons montré qu'il est possible de définir des régions océaniques à partir de ces informations et que ces « provinces génomiques » sont étroitement liées au transport du plancton dans les grands courants océaniques. Alors que celui-ci est toujours en mouvement et que de nombreuses espèces peuvent être qualifiées de « généralistes » ou « cosmopolites », nous avons des preuves solides que des facteurs biologiques, chimiques et physiques du paysage marin influencent la composition du plancton. »

#### Pourquoi ce travail est-il important ?

« Bien que nous ne comprenions pas encore pourquoi il en est ainsi, ces résultats soulèvent des questions importantes. Par exemple, nous avons développé des modèles théoriques simulant la manière dont les provinces génomiques peuvent être influencées par le changement climatique, en supposant un scénario de maintien des émissions des gaz à effet de serre (scénario RCP8.5). Les résultats prévoient que différents paramètres du changement climatique, comme la température de l'eau mais aussi sa teneur en éléments nutritifs, conduiront probablement certaines provinces à s'agrandir alors que d'autres rétréciront et que presque toutes migreront vers les pôles. Cela pourrait avoir des implications majeures pour la vie marine et affecter la fonction globale des écosystèmes planctoniques. Cela pourrait également engendrer d'importants impacts sociaux et économiques : par exemple, les poissons se déplaceront probablement avec leurs proies planctoniques et certains pêcheurs devront peut-être quitter les zones économiques de leurs pays pour assurer des prises. Il est actuellement difficile de chiffrer avec certitude les impacts et il est urgent d'augmenter la résolution de ces observations dans le monde entier. »

#### Quelle est l'histoire derrière ces constats ?

« Nous avons développé des algorithmes pour explorer les immenses jeux de données *Tara Oceans* et classer des paires d'échantillons en fonction des proportions d'ADN commun qu'ils partagent. Un étudiant est venu me trouver et m'a proposé de juxtaposer cela sur une carte du monde. À notre grande surprise, il est devenu évident que nous pouvions esquisser une répartition géographique du plancton dans l'Océan sur la base de données génomiques. Nous avons passé plusieurs années à vérifier nos observations. Cette recherche s'appuie sur de nombreux travaux précédents qui concernent l'organisation et le partitionnement de l'Océan. Les chercheurs et chercheuses extraient des informations à partir d'observations océaniques et proposent une multitude de divisions océaniques basées sur des facteurs tels que la répartition des espèces ou les conditions environnementales. Les divisions les plus connues sont probablement les biomes et les provinces « biogéochimophysiques » définies par Alan Longhurst, un océanographe canadien. Bien que nous puissions comparer nos résultats, la logique qui les sous-tend est assez différente et il reste encore beaucoup à comprendre, en tenant compte de facteurs tels que les variations saisonnières et une vaste gamme de dynamiques océaniques. »

#### Quel a été l'impact du projet sur l'exploration des provinces génomiques de l'Océan ?

« Même si la cartographie initiale a été achevée avant le début du projet, celui-ci a fourni une expertise essentielle pour comprendre la nature de ces provinces génomiques. Dans le cadre du projet, Janaina Rigonato a rejoint mon groupe de recherche et dirigé l'analyse d'une partie essentielle des données provenant de la zone « mesopélagique » de l'Océan, une strate très importante de la colonne d'eau située juste sous la zone lumineuse. En particulier la collection d'échantillons de *Tara Oceans* permet pour la première fois d'étudier finement l'ensemble de communautés de zones pauvres en oxygène (OMZ) dont on prévoit la croissance avec le changement cli-

matique. La contribution de Janaina a permis d'approfondir énormément notre compréhension de ces communautés et de leurs interactions, entre elles et avec leur environnement. Dans le même temps, le projet *Plancton Océanique Climat et Développement* a été l'occasion pour les chercheurs formés de venir en Europe et de participer à ce travail d'importance mondiale. De tels échanges sont cruciaux et nous devons travailler en étroite collaboration avec des experts du monde entier afin de combler les nombreuses lacunes de nos connaissances. J'espère vivement que nos collaborations se poursuivront à l'avenir. »

#### Qu'est-ce qui vous enthousiasme le plus dans ce travail ?

« Il y a plus de dix ans, lorsque l'expédition a pris la mer, c'était très excitant : nous plongeons dans l'inconnu au début d'une aventure importante et nous avons l'impression d'être des pionniers. Maintenant, l'aventure est peut-être encore plus excitante, nous savons que la logique du programme *Tara Oceans* fonctionne bien mais nous n'en sommes qu'aux prémices en matière de compréhension de la diversité planctonique, de sa génétique et surtout sur le rôle du plancton dans le fonctionnement des grands cycles géochimiques dont le climat fait partie. Néanmoins, nous commençons à tirer parti de ces descriptions et à nous concentrer sur la dynamique du plancton. Nous serons bientôt en mesure de développer des modèles plus explicatifs de la diversité et des fonctions des écosystèmes dans l'Océan. L'un de mes grands espoirs est de découvrir des fonctions planctoniques telles que des voies et des composés métaboliques pouvant mieux comprendre les interactions entre le plancton et le changement climatique. La recherche que je mène est très fondamentale, mais j'espère que d'autres chercheurs et chercheuses pourront mettre à profit ces données et nos analyses pour découvrir des fonctions biologiques permettant une conversion de procédés industriels tels que des voies et des composés métaboliques pour une production circulaire de matériaux et d'énergie. »

## Vers une meilleure gestion de la production halieutique par le biais de la modélisation écosystémique

Identifier les bases biologiques et écosystémiques à l'origine des migrations et des changements au sein des stocks halieutiques est une priorité aujourd'hui. En effet, avec la crise climatique, la pêche est susceptible d'évoluer, les espèces migrent. Il est donc urgent de mieux prédire ces déplacements, de s'adapter et d'assurer la sécurité alimentaire des communautés côtières et intérieures.

Entre 2018 et 2021, le projet *Plancton océanique, Climat et Développement* a financé la recherche d'un postdoctorant sénégalais, Baye Cheikh Mbaye, basé à l'Institut de recherche et développement (IRD). L'objet de ses recherches était de développer une nouvelle configuration de modèle écosystémique marin de prévision des stocks halieutiques existant APECOSM avec l'inclusion de données sur le zooplancton. Ces travaux ont pour finalité d'étudier les effets du changement climatique sur les populations de poissons pélagiques des eaux tropicales et tempérées, estimer les stocks de pêches, quantifier leurs vulnérabilités et étudier des stratégies d'adaptation à travers l'élaboration de scénarios intégrés.

Bien que l'approche écosystémique des pêches soit un concept introduit depuis 1980, sa mise en œuvre reste difficile et n'inclut pas tous les réseaux trophiques. Comprendre le rôle du plancton dans ces modèles permettra de les intégrer comme une composante essentielle des habitats du poisson.

### A. Spectre de taille observable des organismes

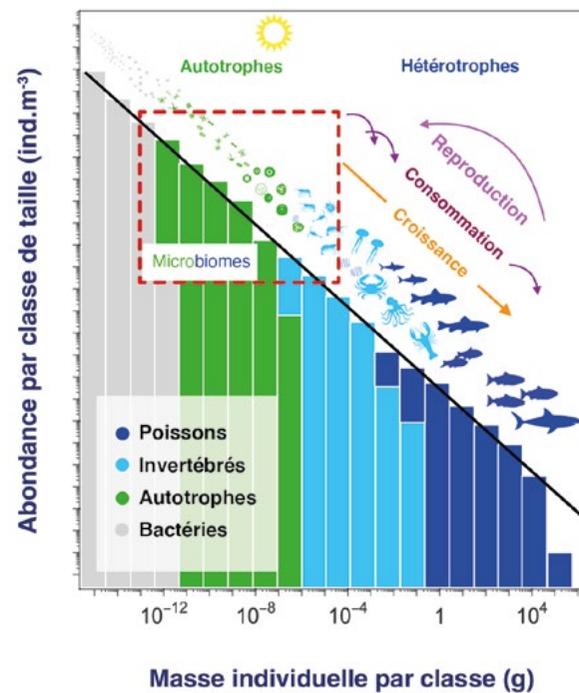


Illustration conceptuelle des répartitions d'abondance des organismes en fonction de la taille corporelle, depuis les bactéries jusqu'aux poissons (redessiné à partir de l'article de Hatton et al., 2021). Le diagramme montre une diminution de l'abondance à mesure que la taille des organismes augmente, ainsi que les processus fournissant la biomasse fixée par les producteurs primaires (autotrophes) aux poissons (hétérotrophes) via le zooplancton métazoaire (appelé ici invertébrés). La croissance, la consommation et la reproduction font partie des processus actuellement inclus dans le modèle budget énergétique dynamique (Dynamic Energy Budget, DEB).





## Baye Cheikh Mbaye

Dans le cadre du projet, Baye Cheikh Mbaye a analysé et combiné un large éventail de données physiques, chimiques et biologiques. Son travail a été supervisé par Olivier Maury, directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement - IRD (Unité mixte de recherche biodiversité marine, exploitation et conservation - MARBEC) et Lars Stemann, professeur à Sorbonne université (Laboratoire d'Océanographie de Villefranche - LOV).

L'objectif est de développer des modèles informatiques permettant de comprendre et prédire la répartition de la dynamique des populations de poissons aux niveaux régional et mondial, en se basant sur la composition et la diversité du plancton présent dans l'Océan. Une attention particulière a été portée aux systèmes de remontées d'eaux côtières (upwelling). Lorsque les eaux riches en nutriments de l'océan profond remontent vers la surface, elles favorisent des explosions spectaculaires de vie marine. Les upwellings soutiennent des pêcheries qui fournissent certaines des prises naturelles les plus étendues et les plus importantes de la planète.

«Ces zones extrêmement productives de l'Océan sont au cœur de la vie et des moyens de subsistance de centaines de millions de personnes dans le monde, notamment au large de l'Afrique de l'Ouest, entre le Sénégal et la Mauritanie, où les alizés côtiers contrôlent le système de remontées d'eau du courant des Canaries. Au cœur de ces remontées d'eau se trouve une grande diversité d'organismes planctoniques. La productivité de ces upwellings est contrôlée par le plancton : les interactions entre espèces et avec le milieu fertilisent les eaux océaniques profondes avec des nutriments. Ces microorganismes forment la base du réseau trophique marin en tant que source principale de nourriture pour les poissons et un large éventail d'organismes marins.

Pourtant, les modélisateurs peinent depuis de nombreuses années à représenter efficacement le plancton dans l'Océan du fait des milliers d'espèces le composant et de leur taille variable. Celles-ci collaborent, rivalisent ou interagissent souvent les unes avec les autres et avec leur environnement et des espèces totalement différentes peuvent jouer des rôles fonctionnels ou nutritionnels similaires. **Pour comprendre les pêches et la répartition des poissons, il ne suffit pas d'étudier les espèces planctoniques de manière isolée, nous devons comprendre l'ensemble de l'écosystème.**

Nous voulons développer des modèles informatiques capables de prédire la taille et la quantité de poissons disponibles dans les eaux en nous basant en plus des facteurs physique de l'Océan (température, courants, salinité, oxygène, etc.), sur des facteurs tels que la quantité, la taille et la composition des communautés de plancton. En combinant ces informations sur une plateforme unique, il sera possible de prédire la quantité de plancton présente n'importe où dans l'Océan, la quantité de poissons disponible pour la pêche, et même la répartition des espèces individuelles de poissons.

Si les remontées d'eau faiblissent, il y aura moins de nourriture disponible pour les poissons. Au Sénégal, il n'y a pas beaucoup de groupes de recherche travaillant sur ces questions à l'heure actuelle et en général nous manquons d'une évaluation complète des pêcheries au large des côtes d'Afrique de l'Ouest. Il est essentiel de combler les lacunes dans nos connaissances. En comprenant mieux la répartition des habitats des poissons, il sera plus facile de développer des aires marines protégées appuyant la survie de ces habitats ou de mettre en place des réglementations pour limiter les activités de pêche. **La modélisation de ces écosystèmes peut aider à identifier**

les zones de l'Océan qui changent beaucoup. C'est très important pour le Sénégal. Avec ces informations, le pays et la région peuvent essayer de protéger ces zones et de soutenir le développement durable de l'Océan.» explique Baye.

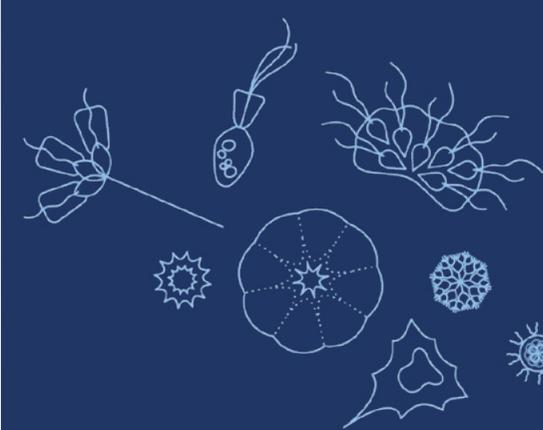
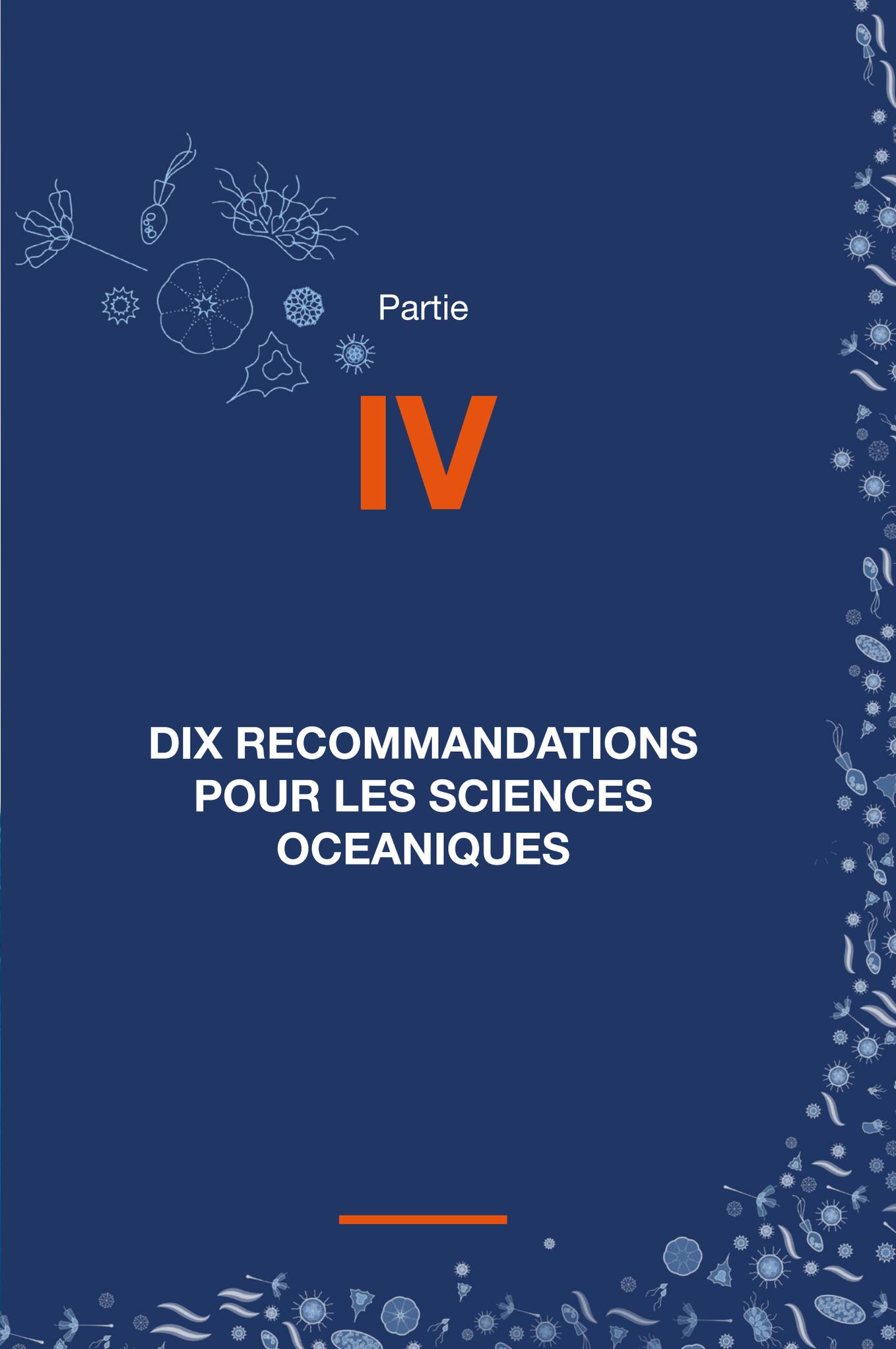
Au cours du projet, Baye a interagi avec des experts de nombreux domaines, des scientifiques interdisciplinaires aux décideurs politiques.

«L'un des aspects les plus enrichissants de mes recherches a été les conversations avec des scientifiques de différents domaines utilisant les données Tara Oceans», dit-il. «J'ai beaucoup appris sur les différents types de zooplancton que je peux représenter dans ma modélisation et comment améliorer ces représentations.

J'ai eu l'occasion de participer à des missions de terrain. C'est incroyable de constater à quel point les écosystèmes océaniques sont diversifiés et combien nous pouvons apprendre d'eux. Dans le cadre du programme, nous

avons également participé à une mission au Sénégal pour rencontrer des scientifiques et des décideurs afin de discuter de ces questions cruciales. **Il est important de forger des liens entre scientifiques et décideurs afin qu'une compréhension mutuelle émerge.** C'était fascinant de voir comment ces discussions ont été initiées, les étapes qui ont été franchies et quelles parties prenantes ont été réunies. Comme il s'agit d'un effort mondial, la recherche océanique permet d'intégrer des chercheurs et chercheuses africains à des programmes internationaux, de la collecte de données à leur analyse et leur traduction ultérieure en politiques. Je suis fier de ce que nous avons accompli ensemble en tant qu'équipe au cours de ce projet et je suis sûr qu'il y a d'autres travaux passionnants utilisant les données Tara Oceans à l'horizon. **Faire face aux menaces qui pèsent sur les poissons et les pêches ne sera pas facile, mais si nous améliorons notre compréhension de ces écosystèmes vitaux, notamment du plancton qui les soutient, nous pouvons y parvenir.»** ajoute-t-il.





Partie

**IV**

**DIX RECOMMANDATIONS  
POUR LES SCIENCES  
OCEANIQUES**



## PROTÉGER ET SURVEILLER LE PLANCTON DANS L'OcéAN

Dans le contexte de la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030), la Fondation Tara Océan établit des recommandations afin de garantir que la science réponde aux besoins de connaissances pour agir contre le changement climatique et la perte de biodiversité.

### CONNAÎTRE LES FONCTIONS DU PLANCTON DANS L'OcéAN

#### 1. Décrire les communautés planctoniques vivant dans l'Océan

Un programme ambitieux et international est nécessaire pour intensifier l'échantillonnage, les observations océaniques, le séquençage génétique, les analyses génomiques et l'inventaire du plancton dans l'Océan. En utilisant un large éventail de techniques, les chercheurs et chercheuses sont en mesure d'exploiter ces données et d'identifier les rôles que jouent les communautés planctoniques dans les fonctions océaniques essentielles telles que la pompe à carbone, la production d'oxygène et la chaîne alimentaire océanique. La recherche peut également mieux prédire comment le plancton s'adaptera en réponse aux perturbations d'origine anthropique et comprendre comment les principaux services écosystémiques seront affectés.

#### 2. Intégrer les données planctoniques dans l'étude de la biologie des écosystèmes

Il est essentiel de lier ces informations planctoniques à une compréhension globale de l'écosystème. La recherche sur le plancton est un effort de recherche mondial, elle offre l'opportunité de créer des approches potentiellement utilisables dans l'étude de tous les biomes à travers le monde. La clé de cet effort global est le développement de protocoles, de méthodes et de normes qui garantissent que les données collectées sur le plancton dans l'Océan soient accessibles, interopérables et réutilisables (principes FAIR). Des initiatives telles que le projet *Plancton océanique, Climat et Développement* mettent en avant les avantages d'intégrer des chercheurs et chercheuses de pays actuellement sous-représentés dans la recherche océanique mondiale à des projets internationaux afin de développer une compréhension tridimensionnelle du plancton.

#### 3. Comprendre le plancton pour développer des biens utiles à la société

Les microorganismes et les molécules créés par le biais de leurs interactions sont essentiels à la production de nombreux médicaments et aliments. Dans cet immense écosystème se trouve un vaste potentiel de percées dans des domaines tels que la pharmaceutique, l'aquaculture, la séquestration du carbone et les biocarburants. Pour tirer parti de ces opportunités, il est essentiel que des plateformes, des mécanismes de financement et des incitations soient développés pour soutenir la découverte. Cela permettrait également d'identifier les pistes et les efforts internationaux nécessaires pour répondre aux questions importantes liées à la propriété intellectuelle, à la durabilité et aux normes d'innovation ouverte.

#### 4. Développer les moyens de diagnostiquer les changements au sein des communautés planctoniques

Les Variables essentielles de la biodiversité (VEB) sont utilisées pour suivre et prévoir les changements de la biodiversité. Des marqueurs similaires sont nécessaires pour diagnostiquer la diversité planctonique mondiale afin d'obtenir une vision plus complète de la santé de l'Océan. Plus les données collectées sont détaillées, plus les chercheurs et chercheuses seront en mesure d'en apprendre davantage sur la dynamique et les interactions des principales communautés planctoniques et sur leurs rôles dans le maintien de la vie dans les zones où la biodiversité est très forte et dans d'autres zones d'intérêt scientifique particulier.

#### 5. Créer des indicateurs de la santé de l'Océan basés sur la science du plancton pour appuyer la prise de décision

À l'échelle mondiale, il existe des outils basés sur la science qui évaluent la santé de l'Océan. Par exemple, l'Ocean Health Index fournit des outils d'évaluation pouvant guider les décideurs en matière d'utilisation durable de l'Océan dans des domaines tels que la protection des côtes, la qualité de l'eau, la biodiversité et la séquestration du carbone. Malgré son rôle essentiel, le plancton n'est pas intégré en tant que variable dans ces outils. Pourtant, les connaissances sur le plancton permettraient de prédire leurs réponses face au changement climatique, l'impact de ces changements sur leurs services écosystémiques et de comprendre comment restaurer la santé de certaines zones de l'Océan.

#### 6. Fixer des objectifs ambitieux pour protéger et surveiller le plancton

Il est essentiel que les connaissances développées à partir de l'étude des communautés planctoniques soient utilisées pour guider le développement et la mise en œuvre d'objectifs clés pouvant stimuler la surveillance et la protection du plancton, de la même manière que les Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies ont inspiré des mesures dans le développement d'un avenir plus durable pour la planète.

Ces objectifs devraient incorporer des domaines qui concernent :

- les aires marines protégées (AMP) ;
- l'intégration du plancton dans les modèles climatiques et de durabilité ;
- l'utilisation durable des ressources océaniques ;
- le développement des compétences nécessaires pour faire avancer la recherche ;
- la mise en place d'interfaces de la science vers le politique efficaces ;
- un travail de sensibilisation mondial au plancton et à son importance pour la santé de l'Océan et de la planète, ainsi que pour l'avenir de l'humanité.

## PERMETTRE DES CONDITIONS FAVORABLES POUR LA RECHERCHE

### 7. Développer les moyens de la recherche pour mieux observer les communautés planctoniques dans l'espace et dans le temps

Des bases de données complètes qui couvrent les morphologies, les gènes, les protéines, les cellules et les symbioses sont nécessaires pour comprendre la dynamique des communautés planctoniques dans leurs habitats et environnements. Ces communautés fluctuent et se déplacent en permanence, des observations sont donc nécessaires sur différentes échelles de profondeur et de temps. Pour obtenir ces données, il est nécessaire de :

- investir dans des méthodes d'observation de l'Océan telles que des observatoires microbiens à long terme en haute mer ;
- organiser des expéditions dédiées à des régions peu étudiées de l'Océan, notamment dans l'hémisphère Sud ;
- encourager l'innovation dans des domaines tels que l'automatisation et l'intelligence artificielle ;
- développer des boîtes à outils et des stratégies afin de mobiliser des chercheurs et chercheuses et des scientifiques citoyens pour la collecte et l'analyse des données dans le monde entier ;
- intensifier l'utilisation de techniques telles que les satellites, les pièges à sédiments et les bouées.

### 8. Répondre aux besoins financiers des programmes de recherche

Bien que les expéditions de la goélette *Tara* et les projets connexes aient permis d'acquérir une compréhension plus complète de la nature et du rôle du plancton dans l'Océan, il reste encore un long chemin à parcourir. Davantage de projets à grande échelle doivent être organisés et financés pour observer et échantillonner le plancton, en particulier dans les zones sous-représentées moins étudiées telles que l'hémisphère Sud. Des infrastructures de recherche doivent être développées dans des domaines de première importance tels que les biobanques et l'informatique. Des programmes de financement flexibles et à différentes échelles sont nécessaires pour accélérer le développement d'aspects clés de la recherche :

- l'utilisation de la science des données et de l'intelligence artificielle ;
- le développement de modèles aux niveaux local, régional et international ;
- la mise en œuvre d'observations du plancton et de ses activités à petite échelle, plus fréquentes et de meilleure résolution ;
- l'optimisation des analyses génétiques permettant d'explorer les processus contrôlant la diversification des organismes planctoniques, de mieux comprendre leurs vulnérabilités et leur résilience vis-à-vis des changements globaux, ainsi que de prédire leurs réponses face aux perturbations d'origine anthropique.

### 9. Garantir un accès libre aux données

Des discussions sont en cours pour mettre en place un système de partage des bénéfices issus de l'utilisation des données biologiques, telles que les informations sur les séquences numériques (DSI). L'accès aux ressources génétiques en haute mer doit garantir que les données soient ouvertes à tous par le biais des référentiels de données existants. La découverte des secrets des microbiomes marins est une opportunité unique de développer des collaborations et d'inclure tous les pays du monde vers un objectif commun de connaissance.

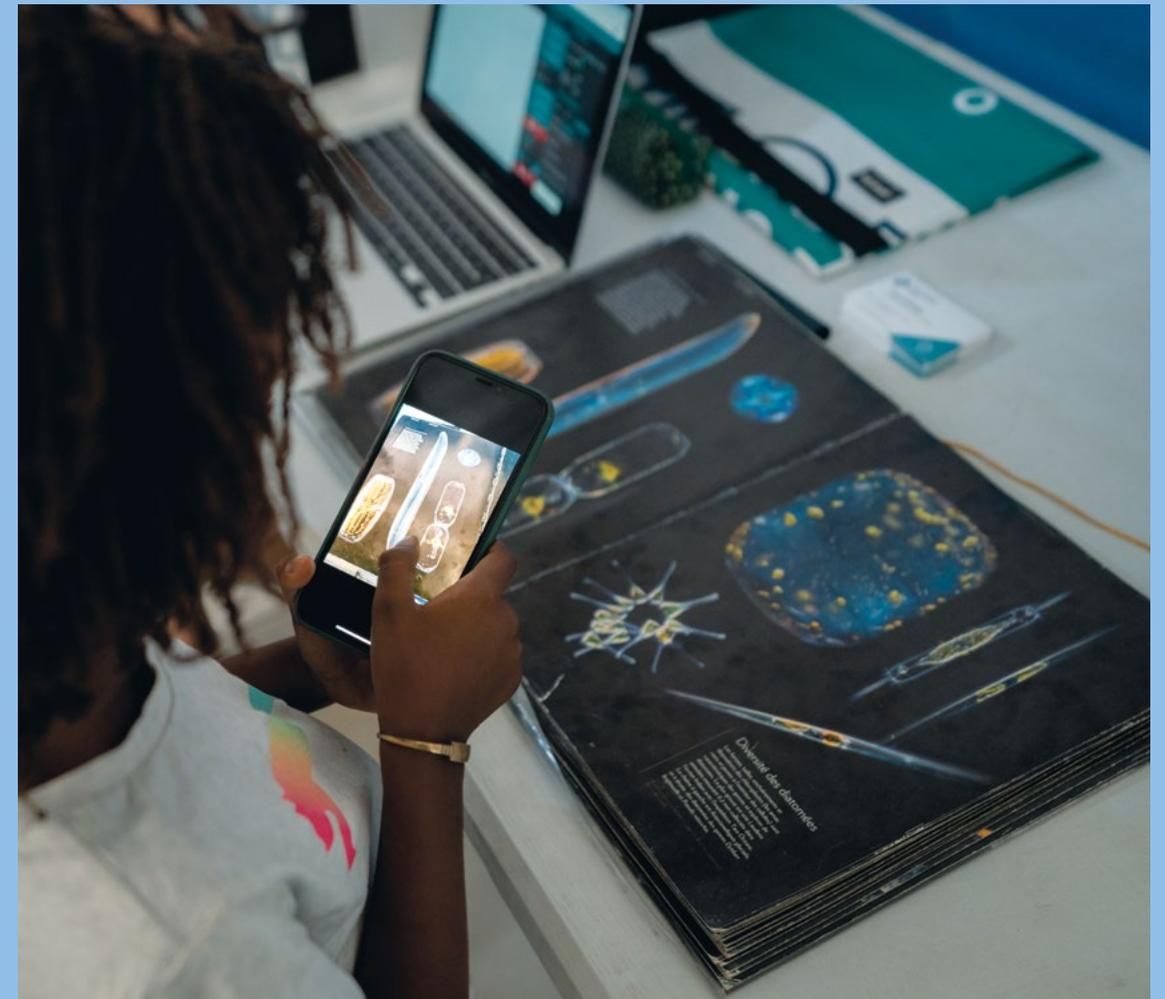
Il sera important d'utiliser le cadre de la science ouverte pour développer des programmes de recherche avec les pays en développement visant à renforcer leurs capacités, à partager les données et à élargir le soutien à la recherche sur le plancton, afin de contribuer à un partage juste et équitable des avantages et de la compréhension de l'Océan.

## CRÉER UNE CULTURE SUR L'OcéAN AUPRÈS DU GRAND PUBLIC

### 10. Mieux comprendre la socioécologie du plancton

Il est important de mieux comprendre comment les services écosystémiques fournis par le plancton affectent les sociétés. D'une part, cela implique d'identifier la façon dont les activités humaines interagissent avec le plancton, comment celui-ci soutient des communautés humaines en fournissant certains moyens de subsistance, ainsi que les coûts sociaux que la mauvaise santé des écosystèmes planctoniques implique.

D'autre part, le potentiel de mobilisation du plancton pour protéger l'environnement, produire des conditions favorables à l'aquaculture ou développer de nouveaux médicaments soulèvent des questions éthiques considérables. Elles nécessitent donc, en amont, un engagement des scientifiques, des politiques et du grand public, ainsi que des approches transversales rassemblant des experts de domaines aussi divers que le droit, l'éthique, l'histoire, la culture, la philosophie et les droits de l'Homme.



### Les principaux enjeux pour un Océan protégé

L'Organisation des Nations Unies, à travers sa Décennie pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030), encourage l'humanité à penser au-delà de notre savoir actuel. Pour ce faire, il faut surmonter une série de défis conceptuels, techniques et organisationnels qui obligent tous à mieux développer, intégrer et communiquer la compréhension des communautés planctoniques à l'origine de nombreux événements naturels majeurs. Le projet *Plancton océanique, Climat et Développement* a permis de s'appuyer sur le travail international, ouvert et collaboratif de l'expédition *Tara Oceans*. Il a généré des synergies, des partenariats, des connexions et des interfaces pouvant soutenir les politiques et les actions afin de protéger l'Océan dans les pays actuellement sous-représentés dans la recherche océanique mondiale. Mais construire ce pont entre ces sciences innovantes et l'arène politique est une question complexe. L'agenda de la protection de l'Océan est historiquement structuré autour d'espèces charismatiques (baleines, dauphins, tortues, etc.) ou d'habitats célèbres tels que la Grande Barrière de corail, la mer des Sargasses ou les îles Galápagos. Des propositions et raisonnements autour d'une approche écosystémique ont émergé au cours des deux dernières décennies mais de nombreuses lacunes dans nos connaissances doivent être comblées afin de prendre en compte l'écosystème marin dans son ensemble.

### Le besoin d'une approche internationale, équitable et holistique des sciences marines pour la haute mer

Comprendre la biodiversité océanique requiert une approche transdisciplinaire et holistique, basée sur des programmes de recherche internationaux, ayant pour objectif d'échantillonner et d'analyser les données provenant de zones situées au-delà des juridictions nationales. À ce moment crucial de la mise en œuvre du Traité BBNJ qui régulera la biodiversité en haute mer, les questions scientifiques qui restent à définir lors de la première Conférence (COP) seront primordiales, notamment en ce qui concerne le processus de définition des aires marines protégées (AMP) ainsi que les mécanismes de supervision et de financement de la recherche en haute mer. Plus généralement, ce traité offre l'opportunité de développer une base de données commune et accessible à tous, composée de jeux de données multidisciplinaires et intégrés dans les domaines suivants : génomique, métagénomique, environnement, taxonomie et imagerie.

### L'Océan : une priorité pour l'agenda 2030 et les objectifs de développement durable

Dans une perspective plus large liée aux enjeux du développement durable, des défis majeurs subsistent au niveau international tels que développer des approches qui harmonisent la protection de la biodiversité et le partage des bénéfices issus de son utilisation, mais également qui fasse avancer la recherche sur le plancton. Parmi les principales activités du projet figurent l'organisation d'ateliers «de la science vers la politique» et d'événements parallèles lors de conférences internationales sur la gouvernance de la haute mer. Avec un programme politique international solide centré autour de la conservation de l'Océan, cette décennie des sciences océaniques peut faire la différence. Le programme de développement durable des Nations unies en atteignant l'objectif n°14 d'ici 2025 peut progresser. Enfin, dans le cadre de la Convention des Nations unies sur la diversité biologique (UNCDB), les États doivent promouvoir une stratégie ambitieuse pour protéger 30 % de l'Océan, avec des aires marines protégées efficaces et contrôlées approuvées d'ici 2030. Protéger la vie océanique, y compris la majorité invisible, est essentiel pour la planète et pour notre humanité. Il n'est pas possible d'attendre une autre décennie, il faut agir maintenant !

# La Fondation Tara Océan

explorer et partager

La Fondation Tara Océan est la première fondation reconnue d'utilité publique consacrée à l'Océan en France. Elle porte une double mission : explorer l'Océan pour mieux le comprendre et partager les connaissances scientifiques sur l'Océan pour susciter une prise de conscience citoyenne collective. Depuis 20 ans, elle soutient une science de l'Océan innovante, en partenariat avec des laboratoires de recherche d'excellence pour étudier la biodiversité marine ainsi qu'observer et anticiper les impacts du changement climatique et des pollutions.

Face à l'urgence de faire de la protection de l'Océan une responsabilité commune, la Fondation Tara Océan sensibilise les citoyens aux enjeux de l'Océan, éduque les jeunes générations, facilite la coopération internationale et mobilise les décideurs politiques. Grâce à son statut d'Observateur Spécial aux Nations unies, la Fondation Tara Océan participe activement aux décisions importantes pour l'Océan. Étudier et protéger l'Océan, c'est prendre soin du système global de la planète et de notre avenir.

[www.fondationtaraocean.org](http://www.fondationtaraocean.org)

## Le projet *Plancton océanique, Climat et Développement*

Ce document a été réalisé par la Fondation Tara Océan, avec le soutien du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) dans le cadre du projet *Plancton océanique, Climat et Développement*, initié en 2016. Le FFEM est un fonds public bilatéral qui finance des projets dans les pays émergents et en développement visant à combiner préservation de l'environnement, développement territorial et renforcement de la résilience au changement climatique. L'objectif du projet a été de structurer un programme de recherche et de plaidoyer dans le domaine des écosystèmes océaniques pour aider à renforcer les capacités des pays du Sud afin de répondre à leurs enjeux de développement et de gouvernance de l'Océan aux niveaux local, régional et international, notamment en ce qui concerne la haute mer.

[www.ffem.fr](http://www.ffem.fr)





FONDS FRANÇAIS POUR  
L'ENVIRONNEMENT MONDIAL

Fondation  
**taraocéan**  
explorer et partager

8 rue de Prague, 75012 Paris, France

[www.fondationtaraocean.org](http://www.fondationtaraocean.org)

Ce document a été réalisé avec le soutien du Fonds Français pour l'Environnement Mondial.