

> *Tara Oceans* n'étaient pas connues de la science. Ce chiffre serait de l'ordre de 90% pour les virus.

Vous avez obtenu des résultats surprenants concernant des protistes nommés rhizaires. De quoi s'agit-il ?

Éric Karsenti : Les rhizaires constituent un grand groupe de protistes auquel appartiennent notamment les radiolaires. Ils ont un squelette minéral dont émergent des pseudopodes. Certains rhizaires sont des géants dans le microplancton et peuvent atteindre plusieurs centimètres, mais ils sont extrêmement fragiles et passent donc le plus souvent inaperçus dans les prélèvements. Avec plusieurs autres chercheurs, Tristan Biard, de la station biologique de Roscoff, a étudié les rhizaires de taille supérieure à 0,6 millimètre en examinant 1,8 million d'images prises par une caméra spéciale immergée, dans le cadre de 11 campagnes océaniques qui se sont déroulées entre 2008 et 2013, en particulier celle de *Tara Oceans*.

Et quels ont été les résultats ?

Éric Karsenti : Cette étude a notamment permis d'estimer la biomasse constituée par les rhizaires vivant dans les 200 premiers mètres de profondeur. Elle se révèle énorme, très supérieure à ce que l'on soupçonnait : en carbone, elle équivaut à plus de 5% de celle de tous les organismes marins. De plus, les rhizaires sont relativement abondants dans les vastes régions océaniques pauvres en nutriments, où ils seraient avantagés par leur capacité à vivre en symbiose avec des microalgues. Leur biomasse y est équivalente à celle de tous les autres organismes planctoniques de taille comprise entre 0,2 et 20 millimètres. Ces découvertes modifient notre compréhension des écosystèmes planctoniques, et suggèrent que les rhizaires pourraient avoir un poids important dans le bilan des flux de carbone des océans.

Y a-t-il d'autres études de *Tara Oceans* qui portent sur les flux de carbone ?

Éric Karsenti : Lionel Guidi, du laboratoire de Villefranche-sur-Mer, et d'autres chercheurs en ont publié une en même temps que celle de l'équipe associée à Tristan Biard. En s'appuyant sur des analyses informatiques et génétiques, ils ont caractérisé certains réseaux d'organismes planctoniques qui sont associés à l'export de carbone dans les régions océaniques

pauvres en nutriments, l'export de carbone désignant le processus par lequel le carbone contenu dans les organismes marins finit par couler et par se retrouver séquestré dans les fonds. Mais il reste encore beaucoup à comprendre...

Comment étudie-t-on les interactions de tous ces organismes ?

Éric Karsenti : Des méthodes bio-informatiques permettent, à partir des données des séquençages de l'ADN et de l'ARN des échantillons, qui renseignent sur la nature et l'abondance des différents organismes présents, de « cartographier » les interactions. Leur principe consiste à déterminer les cooccurrences et à les analyser. L'idée est par exemple que si un taxon (un type d'organismes apparentés) donné A se retrouve systématiquement dans les échantillons où est présent le taxon B, on « prédit » que les taxons A et B sont en interaction. On vérifie ensuite

l'environnement explique seulement 18% des variations de composition.

Les microorganismes planctoniques sont-ils répartis de façon particulière dans les océans ?

Éric Karsenti : *Tara Oceans* a confirmé des choses que l'on savait déjà, comme le fait que la biodiversité du plancton est plus riche dans les régions tropicales mais qu'il est plus abondant dans les mers froides. Elle a aussi montré que la circulation océanique joue un rôle particulièrement important dans la façon dont se distribuent les communautés d'organismes planctoniques.

Par exemple, une étude a porté sur l'influence des anneaux d'Agulhas (ou anneaux des Aiguilles), de vastes tourbillons qui se forment à l'est de l'Afrique du Sud, entre l'océan Indien et l'océan Atlantique sud. Les données de *Tara Oceans* ont montré que ces anneaux forment une sorte de barrière qui isole l'une

« Les rhizaires auraient un poids important dans le bilan des flux de carbone des océans »

les prédictions bio-informatiques en observant au microscope certains des échantillons, pour confirmer par exemple que les organismes A et B sont bien physiquement associés.

On observe ainsi que la plupart des organismes sont en interaction, qu'il s'agisse de symbiose, de parasitisme ou de commensalisme. Ainsi, il n'y a quasiment pas de protistes isolés. On peut trouver aussi des relations d'exclusion (la présence d'une espèce excluant celle d'une autre), et les chercheurs ont constaté que de telles relations concernent globalement 20% des organismes planctoniques.

Ces cartographies des réseaux d'interactions prennent également en compte les paramètres environnementaux (pH, température, concentration en phosphates...). Or le rôle des facteurs environnementaux dans la composition des communautés planctoniques s'est révélé bien moins important qu'on ne le pensait :

de l'autre les communautés planctoniques des deux océans. Plus généralement, l'analyse des données de l'expédition devrait fournir une vision globale de la concentration des organismes planctoniques et de leur diversité selon les régions. Et la comparaison avec ce que l'on sait sur les poissons sera sans doute utile pour la gestion des pêcheries.

Le réchauffement climatique perturbe-t-il les populations de plancton ?

Éric Karsenti : *Tara Oceans* a mis en évidence une stricte corrélation entre la température et la composition en archées et bactéries du plancton. Dans les profondeurs où la lumière pénètre, la température est, de fait, le principal facteur environnemental qui influe sur la composition du plancton. On devrait donc pouvoir se faire une idée de la façon dont la distribution des organismes planctoniques

MODÉLISER L'ÉCOSYSTÈME OCÉAN

Fort des avancées en écosystémique globale réalisées dans la première décennie du projet *Tara Oceans* (2009-2019), et publiées dans les meilleures revues scientifiques, nous avons pu nous structurer en fédération de recherche (FR2022), un institut virtuel regroupant 22 équipes internationales (11 en France, dont la fondation Tara Océan) autour d'une nouvelle odyssée : *Tara GO-SEE* (Global Ocean Systems Ecology & Evolution). L'objectif est de comprendre les principes fondamentaux d'écologie et d'évolution d'un premier écosystème complexe sur notre planète, en vue d'établir une théorie quantitative robuste de sa dynamique et de sa résilience. Entre les atomes, les cellules, les organismes, d'un côté, et le climat, les étoiles et les galaxies de l'autre, pour lesquels des centaines de milliards d'euros ont été dépensés pour leur étude, se trouvent les écosystèmes : ces réseaux de vie autoorganisés et adaptatifs, qui interagissent avec l'environnement sur de multiples échelles. Les écosystèmes sont peut-être les « objets » les plus complexes de notre Univers, car ils intègrent l'ensemble du vivant dans sa matrice physicochimique ; pour cette raison, ils ont longtemps échappé à la mesure scientifique et semblaient insondables. Or dans *Tara Oceans*, nous avons prouvé le contraire. Grâce à l'échantillonnage systématique du plancton marin sur des échelles taxonomiques (des virus aux animaux), systémique (des gènes aux organismes) et spatiotemporelle (4 ans sur les océans planétaires) intégrales, nous avons généré la plus grande base de données de séquences ADN/ARN et d'images d'organismes à l'échelle d'un biome. Pour la première fois nous percevons les frontières de la complexité réelle d'un écosystème global, et nous avons développé des concepts et méthodes pour intégrer les données génétiques, d'imagerie, et environnementales (biophysicochimiques), et commencer



L'écosystème marin, dont le plancton est un rouage clé, est-il l'« objet » le plus complexe de l'Univers ?

à découvrir la structure et la dynamique du grand réseau de vie planctonique. Dans *Tara GO-SEE*, nous proposons de poursuivre notre approche « pan-écosystémique » pour répondre, au cours des 10-15 prochaines années, à quelques questions fondamentales. Comment la vie s'est-elle diversifiée et complexifiée au niveau des écosystèmes ? Comment les organismes interagissent-ils et quelles sont les règles d'auto-organisation du vivant dans les écosystèmes ? Comment intégrer la complexité de la vie dans les modèles des grandes fonctions émergentes de l'océan (pompe à carbone, climat, réseaux trophiques et pêcheries). Notre hypothèse principale est que les interactions des organismes et leurs comportements collectifs sont à la base des mécanismes qui génèrent la biodiversité et régulent les communautés. Or ces forces

« symbiotiques » n'ont pas encore été quantifiées ni modélisées aussi bien en écologie qu'en évolution. Une approche au niveau de l'écosystème est nécessaire pour une compréhension holistique de ces processus qui pourraient tout simplement réguler notre monde. Pour ce faire, nous allons non seulement continuer à exploiter les données écomorphogénétiques issues des expéditions *Tara Oceans* et *Tara Pacific*, mais aussi développer des nouvelles approches analytiques pour combler des lacunes d'information, et intégrer et formaliser les données hétérogènes. Enfin nous retournerons en mer avec une nouvelle océanographie suffisamment flexible et réactive pour mesurer les processus clés de l'écosystème océan sur des échelles spatiotemporelles pertinentes.

COLOMBAN DE VARGAS,
FONDATION TARA OCÉAN

changera avec le réchauffement climatique. Par ailleurs, les résultats que j'ai déjà évoqués concernant les flux de carbone sont un avant-goût de ce que l'on peut apprendre sur la place du plancton dans la machinerie climatique de la Terre.

Quelles suites aura *Tara Oceans* ?

Éric Karsenti : D'abord, l'exploitation complète des échantillons et données recueillis demandera encore quelques années de travail. De nouvelles publications sont

d'ailleurs en cours, l'une sur la circulation océanique et la répartition du plancton, une autre sur la métatranscriptomique des eucaryotes, une troisième sur les îles du Pacifique et le rôle du fer, la quatrième sur les génomes de dizaines d'organismes unicellulaires clefs. Il reste aussi à exploiter la dernière phase de la mission, qui s'est déroulée dans l'océan Arctique. De plus, toutes les données de *Tara Oceans* sont mises en accès libre et public, ce qui permet à tous les chercheurs de les exploiter.

À cela s'ajoutent les données issues de la dernière expédition *Tara Pacific* (2016-2018), qui a porté sur les systèmes coralliens du Pacifique, et notamment le plancton qui y est associé. Mais nous avons surtout pu créer une fédération de recherche internationale en automne 2018, avec une vision renouvelée de notre projet au long cours de percer les mystères de l'écosystème océan (voir l'encadré ci-dessus). ■

Propos recueillis par Maurice Mashaal