

MIXOTROPHIE ET POMPE BIOLOGIQUE À CARBONE



Dans ce dinoflagellé *Ornithocercus magnificus*, observé dans la baie de Villefranche-sur-Mer, les petites billes orangées sont des cyanobactéries symbiotiques.

De récents projets, telle l'expédition *Tara Océans*, qui a débuté en 2009, ont permis de préciser la dynamique entre les différents types de plancton: le phytoplancton, ou plancton végétal, autotrophe (qui pratique l'autoalimentation et la photosynthèse); le zooplancton, ou plancton animal, hétérotrophe (qui se nourrit des autres); et les mixotrophes, qui combinent autotrophie et hétérotrophie. Grâce à ces résultats, les chercheurs ont aussi déterminé le rôle du plancton dans la séquestration du carbone atmosphérique *via* la pompe biologique à carbone.

En effet, l'océan profond est le plus grand réservoir de carbone de la planète. Il a emmagasiné à lui seul un tiers du dioxyde de carbone (CO_2) émis depuis le début de l'ère industrielle. Ce carbone est séquestré au fond des océans par un ensemble de processus physico-chimiques et biologiques qui constituent la «pompe à carbone océanique».

Au sein de ces mécanismes, la pompe dite biologique assure le transfert du CO_2 atmosphérique vers l'océan profond *via* la photosynthèse. Dans ce pompage, le CO_2 d'origine atmosphérique est fixé par l'activité photosynthétique des microorganismes marins autotrophes ou mixotrophes. Il subit ensuite une série de transformations conduisant à sa séquestration en profondeur principalement sous forme de particules, surnommées «neige marine» en 1951 par la biologiste marine et écologiste américaine Rachel Carson. Cette neige, produite à la fois par les autotrophes, les hétérotrophes et les mixotrophes, est composée de déchets, d'organismes morts, etc. La mixotrophie

joue un rôle important dans ce processus puisqu'elle intervient à la fois au niveau du transfert du CO_2 atmosphérique vers l'océan *via* la photosynthèse et de son transport vers le fond *via* la production de particules marines.

Des études avaient montré que le flux de carbone vers les profondeurs dépend de la composition de la communauté planctonique de surface. Mais les informations sur cette communauté restaient très limitées, notamment à cause de sa complexité et des méthodes d'observation dont disposaient les chercheurs. Les récents développements techniques en matière de séquençage massif ont permis d'appréhender le système vivant depuis

La mixotrophie intervient *via* la photosynthèse et *via* la production de particules marines

la molécule jusqu'à l'écosystème. Ces nouvelles mesures collectées au cours de l'expédition *Tara Océans* ont conduit à une description quasi complète du catalogue d'organismes planctoniques incluant virus, procaryotes et eucaryotes. Couplées à des approches informatiques poussées, ces mesures ont mis en évidence la richesse et la complexité des interactions qui relient ces organismes. À partir de l'ensemble de ces informations, avec nos collègues, nous avons décrit le réseau d'espèces, ou «Facebook du plancton», liées à la pompe biologique des océans.

Au sein de ce réseau, de nombreux acteurs, tels que certaines algues photosynthétiques (en particulier des diatomées) ou des organismes du zooplancton (des copépodes), étaient déjà connus comme ingrédients majeurs de la pompe biologique. Mais l'implication de certains microorganismes (parasites unicellulaires, cyanobactéries et virus) dans la séquestration du carbone était jusqu'alors très sous-estimée. En particulier, ce réseau contient de nombreux mixotrophes, tels les dinoflagellés *Noctiluca* ou les collodaires, des radiolaires unicellulaires marins qui appartiennent au super-groupe des *Rhizaria*.

Les radiolaires sont très intéressants parce que certaines de ces espèces mixotrophes vivent en symbiose avec des microalgues intégrées à leur cytoplasme, et on a très longtemps sous-estimé leur abondance. Un autre cas de symbiose pertinente ici est celle entre des algues procaryotes, les cyanobactéries, et des dinoflagellés tels que les *Ornithocercus* (voir la photographie ci-dessus). Il reste beaucoup d'aspects à étudier: par exemple, nous ne savons toujours pas à qui profite le plus la symbiose entre l'hôte hétérotrophe et son symbiote autotrophe.

Connaître la structure de ces réseaux et le mode trophique des organismes qui le compose ouvre de nombreuses perspectives, notamment la possibilité de mieux appréhender l'impact de ces organismes sur l'environnement et, à l'inverse, du changement de l'environnement sur ces communautés.

LIONEL GUIDI ET JOHN DOLAN
Laboratoire d'océanographie
de Villefranche-sur-Mer

> cette zone, lorsqu'ils ont prélevé des échantillons d'eau lors de leurs expéditions.

À partir de ces observations, mes collègues et moi avons développé deux simulations de chaîne alimentaire. Nous avons trouvé que la simulation prenant en compte la mixotrophie correspondait le mieux aux quantités de nutriments – et à leur cycle de renouvellement – mesurées par Mikhail Zubkov. Au lieu d'être en compétition avec le phytoplancton, les bactéries croissent en utilisant les sucres et autres nutriments libérés par les mixotrophes. Ceux-ci se nourrissent des bactéries, qui leur fournissent plus de fer et de phosphate qu'ils n'en pourraient extraire directement de l'océan. Et le modèle n'était en accord avec les observations que si les mixotrophes en question étaient constitutifs (voir l'encadré page 55).

Un autre élément clé est à prendre en compte. Avec les mixotrophes, et non avec le phytoplancton classique, les niveaux de fixation du carbone – la quantité de dioxyde de carbone extraite de l'eau de mer par les organismes – augmentent notablement. Nos découvertes suggèrent que si ces organismes hybrides n'étaient pas présents, la quantité globale de carbone qui circule entre l'eau de mer et l'atmosphère (et qui contribue au réchauffement climatique sous la forme de dioxyde de carbone), pourrait être bien plus importante qu'elle ne l'est.

LES MIXOTROPHES SONT AU CŒUR DE PLUSIEURS PROBLÉMATIQUES

Comme nous l'avons évoqué, les mixotrophes sont présents dans les eaux côtières, et ils peuvent avoir un impact important sur la pêche et l'aquaculture. En 2017, nous avons utilisé un modèle de plancton de la mer du Nord intégrant divers types de mixotrophes et avons découvert que lorsque de petits mixotrophes mangent des bactéries marines, leur population croît suffisamment pour surclasser d'autres microorganismes qui tendent à produire des efflorescences algales. Même lorsqu'elles ne sont pas toxiques, ces proliférations sont une source de problèmes pour les élevages de poissons. En effet, l'accumulation de plancton à la surface de la mer bloque la lumière du soleil, ce qui perturbe le cycle des nutriments nécessaires à la croissance des larves. Moins d'efflorescences signifie donc plus de poissons.

Concernant la santé des poissons, il est aussi important que les mixotrophes soient la forme prévalente de plancton en été. Le phytoplancton au sens strict prospère au printemps, mais les populations déclinent ensuite; les fragiles larves de poissons ne peuvent donc pas dépendre de lui, sans quoi elles ne trouveraient pas assez de nourriture en été. Les

mixotrophes, en revanche, sont présents en permanence et constituent une source de nourriture riche et viable.

Les mixotrophes sont au cœur de plusieurs problématiques: la pêche, la prévision d'efflorescences algales destructrices, le changement climatique ou encore la reconstitution des cycles passés du carbone. Le défi, désormais, est de réussir à associer les observations réelles et nos simulations pour comprendre ce

Près des côtes, les mixotrophes ont un impact sur la pêche et l'aquaculture

que font les divers groupes de mixotrophes en fonction de leur localisation et des saisons. C'est important car, tandis que notre climat change, nous devons savoir quelles conditions environnementales peuvent conduire à la prolifération du *Karlodinium* toxique, du *Noctiluca* vert, dangereux pour les écosystèmes, ou encore des ciliés ayant un rôle protecteur en aquaculture. Nous avons franchi la première étape vers cet objectif en cartographiant la présence de différents groupes de mixotrophes à travers les mers du monde. Nous devons encore estimer la taille de leurs populations durant les diverses saisons, car les changements de luminosité et de température ont une forte influence sur leur croissance et leur prolifération.

Il est important de garder en tête que nos conclusions ne peuvent se fonder uniquement sur des simulations. Nous avons donc besoin de récolter davantage de données réelles, non pas en laboratoire, mais *in situ*, directement dans les océans.

En 2017, la Commission européenne a accepté de financer un projet dont l'objectif est de former des chercheurs à faire ces analyses en mer. L'équipe mixotrophe, qui s'agrandit sans cesse, va pouvoir accélérer la mise en place de la prochaine génération de chercheurs. Ensemble, nous espérons comprendre en détail comment des organismes aussi minuscules ont une influence aussi importante sur le monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. K. Stoecker et al., **Mixotrophy in the marine plankton**, *Annual Review of Marine Science*, vol. 9, pp. 311-335, 2017.

L. Guidi et al., **Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean**, *Nature*, vol. 532, pp. 465-470, 2016.

A. Mitra et al., **Defining planktonic protist functional groups on mechanisms for energy and nutrient acquisition**, *Protist*, vol. 167(2), pp. 106-120, 2016.

K. J. Flynn et A. Mitra, **Building the « perfect beast » : Modelling mixotrophic plankton**, *Journal of Plankton Research*, vol. 31(9), pp. 965-992, 2009.