

> Au premier congrès, en 2011, nous avons dressé une liste commune de toutes les espèces mixotrophes que nous avons repérées. Force fut de conclure que la mixotrophie est courante dans les mers et qu'elle est essentielle d'un point de vue écologique.

Par exemple, Per Juel Hansen, de l'université de Copenhague, et ses collègues ont montré que sans un nombre suffisant de cryptophytes (les proies roses du drame introductif), la population de *Mesodinium* serait incapable d'acquérir des chloroplastes et finirait par disparaître. L'équipe de Diane Stoecker et celle de Hae Jin Jeong, de l'université natio-

CERTAINS MIXOTROPHES RÉDUISENT EN ESCLAVAGE DES COLONIES ENTIÈRES DE PROIES PHOTOSYNTHÉTIQUES

nale de Séoul, en Corée du Sud, ont révélé que les mixotrophes utilisant activement la photosynthèse se nourrissent davantage de planctons que lorsqu'ils délaissent la photosynthèse. Une synergie des modes de consommation!

Lorsque la lumière et les nutriments sont abondants, ces mêmes mixotrophes croissent bien plus rapidement que les organismes planctoniques n'exploitant qu'une seule ressource.

En 2012, nous avons voulu aller plus loin et classer les mixotrophes. Nous avons ainsi établi quatre groupes distincts, chacun occupant une place spécifique au sein d'un spectre de comportements.

Le premier critère de distinction est la source de leurs capacités photosynthétiques. Sont-elles intrinsèques ou le fruit d'une chasse? Le groupe doté du matériel génétique permettant de produire et de maintenir l'équipement cellulaire nécessaire à la photosynthèse est celui des mixotrophes constitutifs. Ce groupe rassemble des créatures aux rôles

souvent critiques au sein des chaînes alimentaires. Il compte aussi en son sein quelques fauteurs de troubles *via* des efflorescences destructrices. Par exemple, *Karlodinium* est connu pour causer la mort massive de poissons partout dans le monde, de la baie de Chesapeake aux eaux côtières de la Malaisie. *Prymnesium*, un autre mixotrophe constitutif, a causé une hécatombe parmi les poissons au large du Texas et dans les eaux du parc national britannique *The Broads*. Le coupable libère une substance chimique qui dégrade les membranes cellulaires des organismes planctoniques rivaux. Résultat: ils enflent et éclatent, tandis que *Prymnesium* se régale des débris et explose démographiquement.

À L'ATTAQUE DES MOLLUSQUES

Une autre espèce, *Alexandrium*, produit une toxine qui s'introduit dans les mollusques. Des élevages d'huîtres, de moules et de palourdes ont été contraints de fermer en raison du risque d'intoxication encouru par les consommateurs.

Les espèces du second groupe, les mixotrophes non constitutifs sont obligés de se procurer l'arsenal photosynthétique. On supposait que cette photosynthèse n'était qu'un mécanisme de survie complémentaire, employé uniquement en cas de nombre insuffisant de proies. Nous pensons désormais que l'exploitation de l'énergie solaire est bien plus fréquente et cruciale dans leur mode de vie.

Les mixotrophes non constitutifs peuvent être subdivisés en espèces généralistes et spécialistes. Les ciliés, par exemple *Laboea* et *Strombidium*, sont des généralistes et subtilisent les chloroplastes à de nombreux types d'organismes. Ces généralistes ne peuvent toutefois pas maintenir ces pièces rapportées plus de quelques jours et doivent constamment s'attaquer à de nouvelles proies pour les renouveler. Ce sont souvent des mixotrophes utiles qui contribuent au flux de nutriments dans les chaînes alimentaires nécessaires aux élevages de poissons et de fruits de mer. Ils jouent donc un rôle vital dans la sûreté alimentaire globale.

Les mixotrophes spécialistes ne dépendent que d'un type particulier de proie, mais semblent mieux équipés pour intégrer les photosystèmes volés dans leur propre physiologie. Ils les gardent fonctionnels jusqu'à plusieurs mois. Certains, comme *Dinophysis*, peuvent être dangereux pour les humains à travers des fruits de mer contaminés lors d'efflorescences.

D'autres spécialistes peuvent être classés dans un groupe à part caractérisé par un comportement particulier. Ils ne se contentent pas de subtiliser des fragments de leurs proies, ils réduisent à l'esclavage des colonies entières >

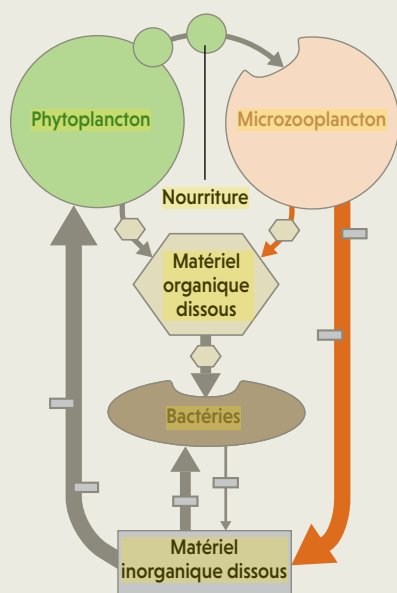
L'EFFET MIXOTROPHE

Lorsqu'on tient compte des mixotrophes, plutôt que de s'en tenir aux seuls phytoplancton et zooplancton, les flux de nutriments au sein de la chaîne alimentaire sont bouleversés. On peut le modéliser en incluant aux modèles des mixotrophes qui volent

les organites photosynthétiques à d'autres organismes (*au centre*) ou des mixotrophes intrinsèquement photosynthétiques (*à droite*). Dans ces deux derniers cas, les résultats correspondent davantage aux observations réelles que les anciens modèles traditionnels (*à gauche*).

SCÉNARIO TRADITIONNEL

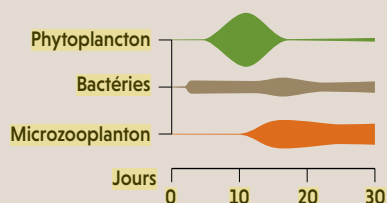
Le phytoplancton utilise l'énergie solaire et les matériaux inorganiques pour se nourrir. Ils se font manger par le microzooplancton. Les bactéries marines décomposent ensuite la matière organique libérée - les déchets - pour les recycler. C'est un cycle contraignant qui limite la taille des populations.



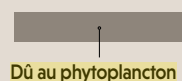
SÉQUENCE CLASSIQUE « UN-DEUX »

Traditionnellement, sur un cycle de trente jours, le phytoplancton (*en vert*) prolifère en premier. C'est seulement après que le microzooplancton prédateur (*en orange*) peut manger suffisamment et accroître sa population. Cette consommation diminue la population de phytoplancton.

Changement dans les populations de plancton

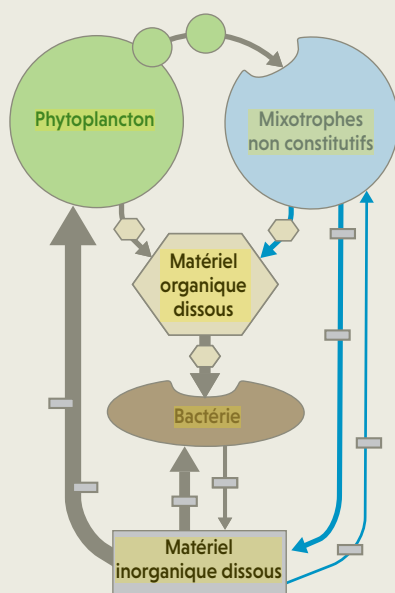


Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
(Total : 3 grammes de carbone par mètre carré)



DES ANIMAUX PHOTOSYNTHÉTIQUES

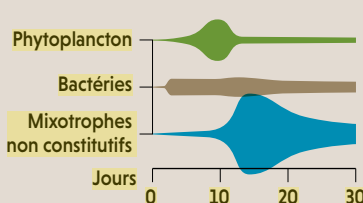
Lorsqu'on remplace le microzooplancton par des mixotrophes non constitutifs, chasseurs et de photosynthétiques, leurs capacités hybrides leur permet de retenir plus de nutriments. La fine flèche bleue qui descend indique une moindre perte de nutriments.



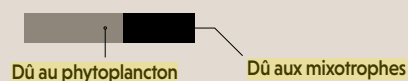
EXPLOSION DE LA POPULATION

Les populations de mixotrophes non constitutifs (*en bleu*) peuvent croître davantage que les prédateurs traditionnels parce qu'elles chassent, mais bénéficient aussi de l'équipement photosynthétique volé à leurs proies. Leur croissance s'interrompt et s'inverse lorsqu'ils ne trouvent plus d'organites à subtiliser.

Changement dans les populations de plancton

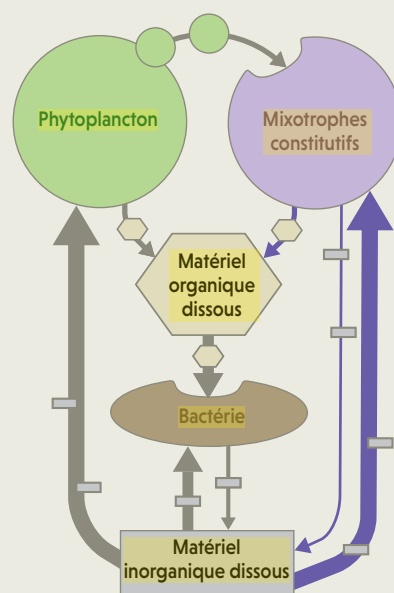


Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
(Total : 3 grammes de carbone par mètre carré)



DES PLANTES QUI CHASSENT

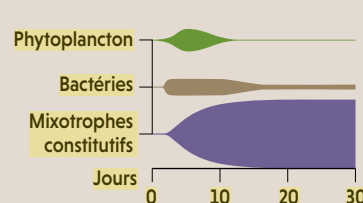
En remplaçant le microzooplancton par des « plantes qui chassent », les mixotrophes constitutifs, le profil de la chaîne alimentaire change. Ces mixotrophes utilisent beaucoup de matériel inorganique (la grosse flèche violette) et sont aussi des prédateurs. Ce groupe survit mieux.



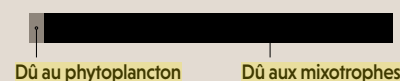
CROISSANCE AUTOSUFFISANTE

Grâce à leurs capacités photosynthétiques innées, les mixotrophes constitutifs (*en violet*) ont juste besoin d'un petit peu d'aide - de la nourriture - de la part du phytoplancton traditionnel pour croître. Leur population augmente rapidement et reste importante.

Changement dans les populations de plancton



Dioxyde de carbone retiré de l'eau de mer
(Total : 3 grammes de carbone par mètre carré)



> de proies photosynthétiques. Les colonies vivent et prolifèrent au sein de leur hôte, se nourrissant de nutriments et profitant de la protection contre les autres prédateurs. Des foraminifères et des radiolaires vivent de la sorte, en tant que serres vivantes... pas toujours inoffensives. Une espèce de foraminifères en particulier, *Noctiluca*, peut causer des efflorescences toxiques.

DES RÉGULATEURS GLOBAUX

La mixotrophie concernerait ainsi une grande partie de la vie océanique, des plantes qui chassent aux animaux photosynthétiques, des minuscules organismes de deux micromètres de longueur à ceux de plus d'un millimètre. Pourquoi est-ce important? Parce que ces petits organismes peuvent avoir une influence majeure sur les océans.

Par exemple, une énorme région pauvre en nutriments couvre des milliers de kilomètres carrés au milieu de l'océan Atlantique. Les scientifiques pensaient que, dans cette zone, le phytoplancton entraînait en compétition avec les bactéries marines pour l'obtention des nutriments inorganiques solubles tels le fer et le phosphate, d'où la raréfaction de ces ressources. Mais Mikhail Zubkov, alors biogéochimiste au Centre national d'océanographie, en Angleterre, et ses collègues ont découvert une population importante de mixotrophes constitutifs (ceux naturellement photosynthétiques) dans cette zone, lorsqu'ils ont prélevé des échantillons d'eau lors de leurs voyages de recherches.

À partir de ces observations, deux modèles de chaîne alimentaire ont été développés. Celui prenant en compte la mixotrophie correspondait le mieux aux quantités de nutriments – et à leur cycle de renouvellement – détectés par Mikhail Zubkov. Au lieu d'être en compétition avec le phytoplancton, les bactéries croissent en utilisant des sucres et d'autres nutriments que les mixotrophes libèrent. Les mixotrophes se nourrissent alors des bactéries, qui leur fournissent plus de fer et de phosphate qu'ils n'en sont capables d'extraire de l'océan par eux-mêmes. Par ailleurs, le modèle ne correspondait aux observations que si les mixotrophes en question étaient constitutifs.

Un autre élément clé est la quantité de dioxyde de carbone extraite de l'eau de mer par les organismes. Les niveaux de fixation du carbone augmentent significativement avec les mixotrophes par rapport à ceux du phytoplancton traditionnel. Sans mixotrophes, les quantités globales de carbone marin, qui contribuent à l'acidification des océans, pourraient être bien supérieures.

Les mixotrophes sont particulièrement importants dans les eaux côtières, où leur influence sur la pêche, la pisciculture, la

conchyliculture... est notable. En 2017, nous avons utilisé un modèle de la mer du Nord incluant divers types de mixotrophes et avons découvert que lorsque de petits mixotrophes mangent des bactéries marines, leur population croît suffisamment pour surclasser d'autres types de planctons impliqués dans des efflorescences algales. Ces proliférations ne sont pas directement toxiques, mais en obstruant la surface elles bloquent la lumière du soleil, perturbant ainsi le cycle des nutriments qui nourrissent les minuscules larves de poissons et les aident à croître. Moins d'efflorescences implique donc plus de poissons.

La santé des poissons est aussi dépendante des mixotrophes. Le phytoplancton strict prospère au printemps, mais sa population décline ensuite : les larves de poissons ne peuvent pas donc pas compter sur lui. Les mixotrophes, en revanche, sont présents en permanence et constituent une source de nourriture riche et constante pour les poissons, en particulier en été.

UN AVENIR EN SUSPENS

Les mixotrophes sont au cœur de beaucoup de problématiques dans le domaine des sciences marines : qu'il s'agisse de la gestion du changement climatique ou de la pêche, ou encore de la reconstitution des cycles passés du carbone ou la prédiction de futures efflorescences algales destructrices. Le défi, désormais, est d'associer les observations réelles et nos simulations pour comprendre ce que font les divers groupes de mixotrophes selon leur localisation et les saisons.

Ces thèmes sont importants car, tandis que notre climat change, nous devons savoir quelles conditions environnementales peuvent conduire à la prolifération des *Karlodinium* toxique, des *Noctiluca* dangereux pour les écosystèmes, ou encore des ciliés nocifs aux élevages de poissons et de fruits de mer. Nous avons récemment franchi la première étape vers cet objectif, en cartographiant les différents groupes de mixotrophes à travers les mers du monde. Nous devons ensuite mesurer leurs effectifs au gré des saisons, car les changements de lumière et de température peuvent drastiquement affecter leur croissance et leur prolifération.

Certains océanologues rappellent que nos conclusions se basent autant sur nos simulations que sur nos observations réelles, ce qui est une critique valide. C'est pour cette raison que nous avons besoin que davantage de scientifiques examinent l'activité des mixotrophes en dehors de leurs laboratoires, directement sur les mers. Partir à la rencontre de ces organismes aux allures de plantes qui cachent bien leur jeu. ■

BIBLIOGRAPHIE

DIANE K. STOEKER ET AL., Mixotrophy in the Marine Plankton, *Annual Review of Marine Science*, vol. 9, pp. 311–335, 2017.

ADITEE MITRA ET AL., Defining Planktonic Protist Functional Groups on Mechanisms for Energy and Nutrient Acquisition ; Incorporation of Diverse Mixotrophic Strategies, *Protist*, vol. 167(2), pp. 106–120, 2016.

KEVIN J. FLYNN AND ADITEE MITRA, Building the «Perfect Beast»: Modelling the Mixotrophic Plankton, *Journal of Plankton Research*, vol. 31(9), pp. 965–992, 2009.