

> 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.

Pleins feux sur les premières galaxies

Les astronomes commencent à observer les galaxies les plus anciennes de l'Univers. Ce qui ouvre une fenêtre sur une période quasi inconnue de l'histoire cosmique.

L'histoire de l'Univers a commencé il y a près de 13,8 milliards d'années, avec le Big Bang. Les cosmologistes et les astrophysiciens ont construit un modèle qui donne une vision globale assez précise de l'évolution de l'Univers depuis sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Mais certains épisodes qui restent encore mal connus pourraient bientôt se dévoiler, notamment ceux concernant la naissance des premières étoiles et galaxies. En effet, les astronomes ont récemment observé des galaxies remontant à quelques centaines de millions d'années après le Big Bang.

La lumière d'une de ces galaxies, nommée SPT0615-JD, a entamé son voyage vers la Terre il y a 13,3 milliards d'années. Elle a été observée pour la première fois en 2017 grâce au télescope spatial *Hubble*, dans le cadre du projet que je dirige: *Relics* (*Reionization, Lensing Cluster Survey*). Ce programme a été conçu précisément pour détecter des galaxies parmi les premières formées dans le cosmos. Le relevé *Relics* a collecté des données entre octobre 2015 et octobre 2017, en accumulant plus de 100 heures d'observation sur le télescope *Hubble*, et plus de 900 heures sur le télescope spatial *Spitzer*. Le projet a permis de >

L'ESSENTIEL

> Réalisé au moyen du télescope spatial *Hubble*, le relevé *Relics* (*Reionization Lensing Cluster Survey*) a traqué certaines des plus anciennes galaxies de l'Univers.

> Pour y parvenir, les chercheurs ont utilisé l'effet de lentille gravitationnelle. Lorsqu'un objet massif

courbe l'espace-temps environnant, il peut amplifier la lumière provenant d'une galaxie en arrière-plan, qui aurait été indétectable sans cet effet.

> *Relics* a ainsi découvert plus de 300 galaxies anciennes, dont l'une date de l'époque où l'Univers n'avait qu'environ 500 millions d'années.

L'AUTEUR



DAN COE
astronome à l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore, aux États-Unis, et responsable du projet *Relics*

Parce que l'espace-temps se déforme au gré de la présence d'objets massifs, la lumière emprunte des trajets parfois déviés. Il en résulte, comme sur cette vue d'artiste, que des galaxies lointaines apparaissent déformées (comme des arcs de cercle), plus brillantes ou présentes en plusieurs exemplaires.

▷ détecter plus de 300 galaxies remontant au premier milliard d'années de l'Univers.

Ces objets sont fascinants parce qu'ils fournissent un aperçu d'une période de l'histoire cosmique qui nous est encore inconnue. En étudiant ces galaxies, nous espérons comprendre comment les premières d'entre elles se sont formées et ont influé sur l'évolution de l'Univers jeune. Par exemple, nous pensons que les galaxies telles que SPT0615-JD (*voir l'image ci-contre*) ont transformé le contenu de l'espace primordial en émettant des bouffées de rayonnement ultraviolet. Ces émissions de haute énergie ont arraché les électrons des atomes d'hydrogène neutre qui emplissaient l'Univers, les faisant revenir à leur état ionisé initial. On parle de la période de «réionisation», mais les détails de ce processus sont assez mal connus. Avec un peu de chance, les galaxies anciennes que nous commençons à observer nous révéleront de nombreuses informations.

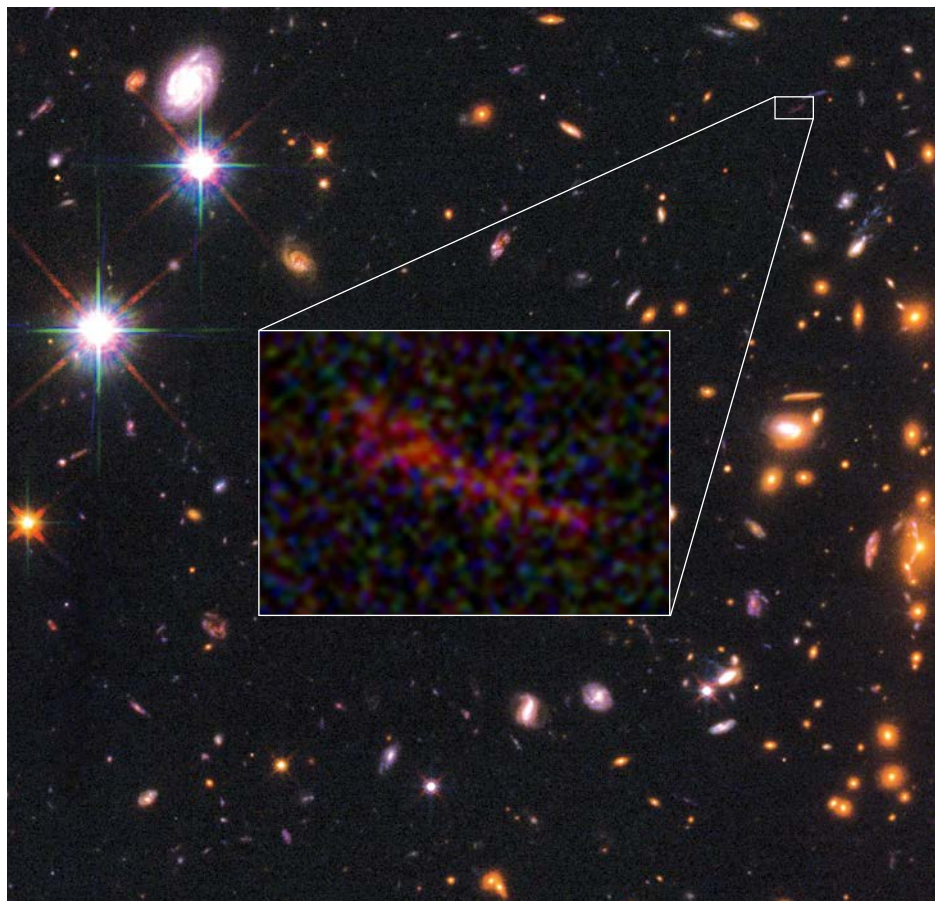
LES PREMIÈRES GALAXIES ÉTAIENT « PURES » ET PETITES

Les galaxies de la première génération ne ressemblaient pas à celles que nous connaissons aujourd'hui. Elles étaient plus «pures», composées presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium gazeux. Avec le temps, les étoiles de ces galaxies ont produit, par fusion thermonucléaire, des éléments plus lourds. Puis, quand ces étoiles sont arrivées en fin de vie, elles ont explosé sous la forme de supernovæ, produisant encore d'autres éléments et les dispersant dans l'espace voisin. Elles ont enrichi les galaxies en «matériau stellaire», dont les éléments nécessaires à l'apparition de la vie.

Les premières galaxies ne formaient pas encore de majestueuses spirales ou des boules ellipsoïdales comme les galaxies que nous voyons aujourd'hui dans le voisinage de la Voie lactée. Elles étaient beaucoup plus désordonnées et beaucoup plus petites (ce qui les rend encore plus difficiles à trouver). Les premières galaxies que nous avons vues faisaient environ 1% de la taille de la Voie lactée, mais leur croissance était rapide, et elles formaient de nouvelles étoiles à des vitesses prodigieuses. En effet, le combustible (le gaz hydrogène) était alors présent en abondance, sous la forme de nuages et de «courants froids» capturés par l'attraction gravitationnelle des galaxies.

Par ailleurs, ces dernières entraient souvent en collision les unes avec les autres; ces fusions ont accéléré leur croissance et ont déclenché des flambées de formation stellaire. Avec l'expansion de l'Univers, les fusions de grandes galaxies sont devenues plus rares, les réserves de gaz se sont réduites. La croissance des galaxies s'est peu à peu ralentie.

Tel est, dans les grandes lignes, le tableau que nous nous faisons de l'évolution des



galaxies. Nous travaillons encore à y apporter les détails, et de nombreuses questions subsistent, en particulier concernant les époques les plus reculées. Quand les premières galaxies se sont-elles formées? Elles étaient petites, mais quelle était leur taille plus précisément? Quelle forme prenaient-elles? Présentaient-elles toutes une formation stellaire intense, ou certaines étaient-elles plus calmes, comme la plupart des galaxies actuelles? Certaines des premières galaxies ont-elles eu le temps de former des disques comme la Voie lactée, ou bien les fusions étaient-elles trop fréquentes pour que cela se produise? En trouverons-nous qui ne contiennent que de l'hydrogène et de l'hélium, ou les premières supernovæ les ont-elles enrichies très vite en éléments lourds? À quelle vitesse les premières galaxies ont-elles crû en masse et en nombre? Avec les résultats du relevé *Relics*, nous allons explorer cette période et chercher des réponses à toutes ces questions.

Rappelons d'abord que la lumière se déplace à une vitesse finie. Dès lors, regarder loin revient à observer l'Univers dans le passé. Et plus une source lumineuse est lointaine, moins elle est brillante, ce qui rend sa détection plus difficile. Pour y remédier, les membres du projet *Relics* ont utilisé la technique des

Cette tache rouge et floue dans l'image prise par le télescope spatial *Hubble* correspond à la galaxie SPT0615-JD, l'une des plus lointaines connues à ce jour, présente dans l'Univers âgé de moins de 500 millions d'années.