

> 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.

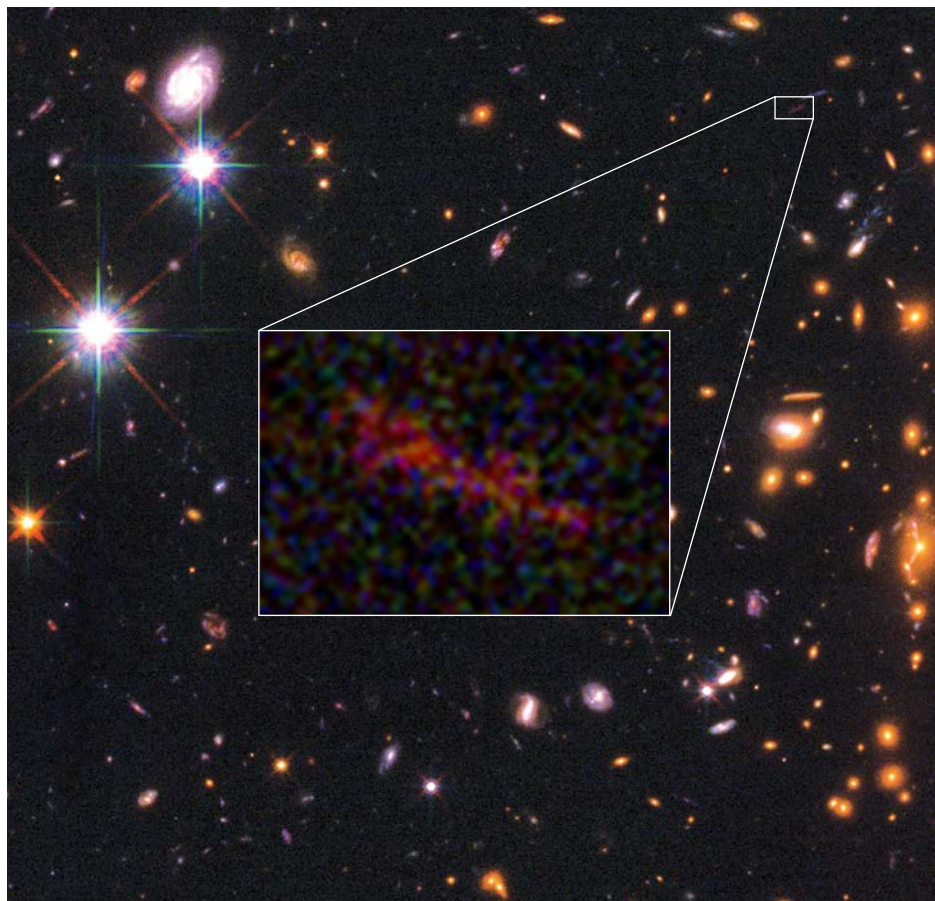
LES PREMIÈRES GALAXIES ÉTAIENT « PURES » ET PETITES

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.

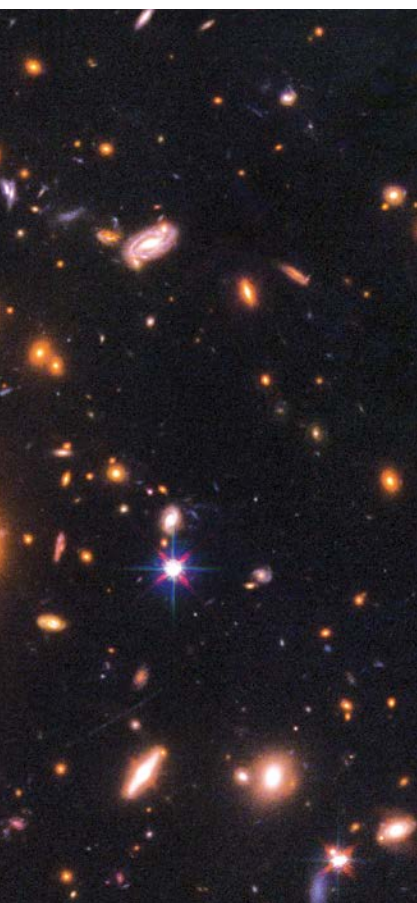
Tel est, dans les grandes lignes, le tableau que nous nous faisons de l'évolution des



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.



«lentilles gravitationnelles» pour voir très loin dans le passé. En d'autres termes, nous avons mis à contribution les amas galactiques massifs, qui pour nous sont comme des loupes naturelles. Ces groupes de galaxies ont une masse combinée telle qu'ils courbent de façon importante l'espace-temps, en accord avec les prédictions de la théorie de la relativité générale d'Einstein.

DES LENTILLES POUR MIEUX VOIR

Quand la lumière d'un objet situé au-delà de l'amas de galaxies se propage dans l'Univers, elle suit l'espace-temps courbé autour de l'amas (voir l'encadré ci-dessous). Elle peut alors suivre différentes trajectoires, ce qui a plusieurs conséquences sur l'image que nous percevons de cet objet lointain: il apparaît gauchi et étiré, parfois en plusieurs images et, si les conditions sont optimales, les différents trajets de la lumière convergent au niveau de l'observateur sur Terre et l'intensité de l'image est amplifiée. Si cet effet vous semble abstrait, vous pouvez vous en faire une idée plus concrète avec un effet optique plus classique. Regardez une bougie allumée à travers la base d'un verre à pied, et vous verrez de multiples images, grossies, de la flamme.

Pour les astronomes du projet *Relics*, l'utilisation des lentilles gravitationnelles a deux intérêts principaux. D'abord, les galaxies grossies

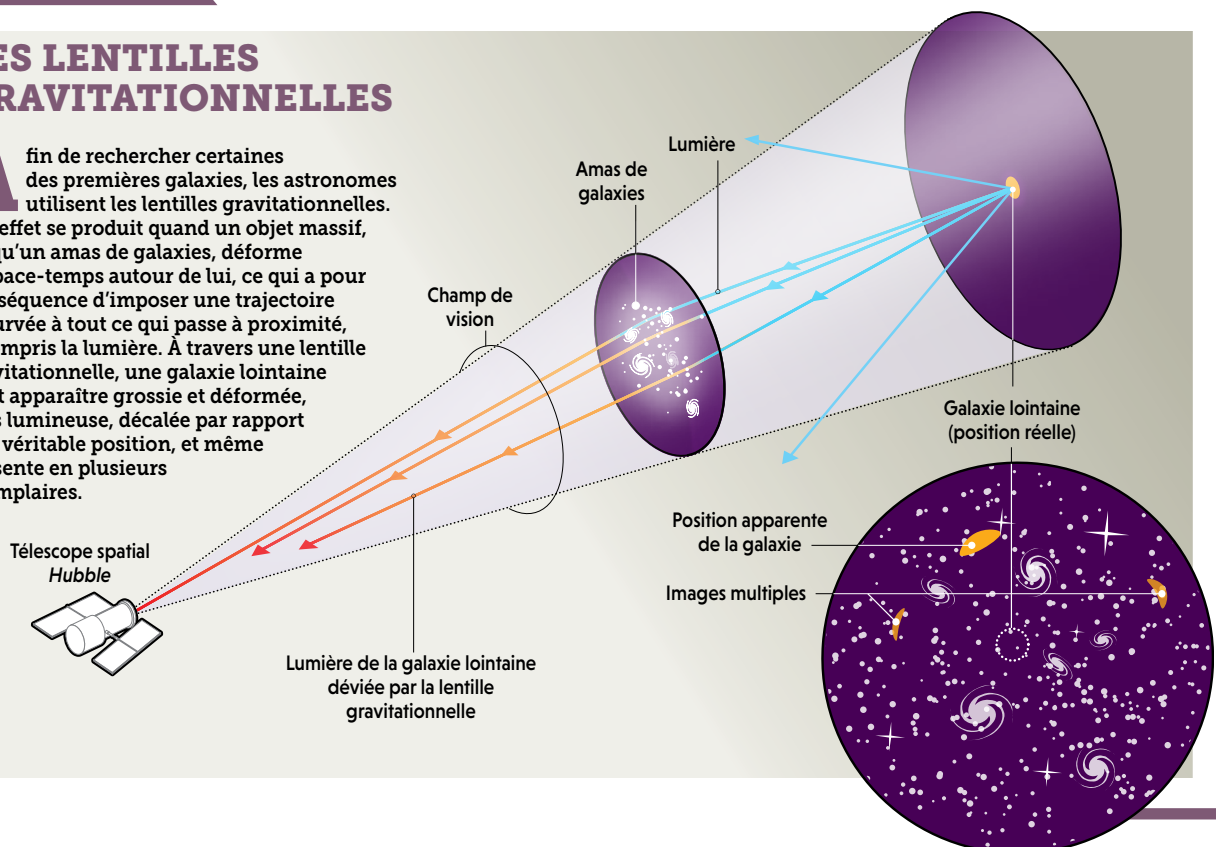
sont plus brillantes et résolues avec davantage de détails que d'ordinaire, ce qui nous permet de mieux étudier leurs propriétés. L'autre point est que les simulations de formation des galaxies (comme Eagle, Illustris, etc.) montrent que les premières galaxies sont très peu brillantes (en plus d'être lointaines), et donc bien au-delà des capacités de détection directe par les télescopes actuels. Il est donc très difficile de révéler ces galaxies par d'autres méthodes, par exemple en observant longtemps des zones «vides», comme dans le cadre des observations de champs profonds par *Hubble*.

Cependant, la technique des lentilles gravitationnelles a une contrepartie importante. Certes, le grossissement nous permet de voir des galaxies moins brillantes, mais, ce faisant, il zoome sur une région plus petite du ciel, qui contient moins de galaxies. La probabilité de voir une galaxie qui nous intéresse diminue, *a priori*. Par chance, l'Univers primordial foisonnait de petites galaxies peu lumineuses, ce qui compense l'effet de zoom: nous détectons beaucoup de galaxies lointaines malgré le champ d'observation restreint.

Trois des plus grands programmes du télescope *Hubble* mis en œuvre ces sept dernières années ont utilisé les lentilles gravitationnelles pour rechercher les galaxies lointaines. Leurs équipes ont, elles aussi, travaillé en tandem avec le télescope *Spitzer*. Ce dernier est ➤

LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Afin de rechercher certaines des premières galaxies, les astronomes utilisent les lentilles gravitationnelles. Cet effet se produit quand un objet massif, tel qu'un amas de galaxies, déforme l'espace-temps autour de lui, ce qui a pour conséquence d'imposer une trajectoire incurvée à tout ce qui passe à proximité, y compris la lumière. À travers une lentille gravitationnelle, une galaxie lointaine peut apparaître grossie et déformée, plus lumineuse, décalée par rapport à sa véritable position, et même présente en plusieurs exemplaires.



> complémentaire de *Hubble* car il est sensible à des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge. Le premier relevé, *Clash* (*Cluster Lensing And Supernova Survey with Hubble*), était un programme de trois ans dirigé par Marc Postman, de l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore. Ce projet a observé 25 amas galactiques. J'ai participé à l'analyse des images de ce relevé et, en 2012, j'ai découvert MACS0647-JD, une galaxie observée juste 420 millions d'années après le Big Bang. Elle était alors candidate au titre de la galaxie la plus lointaine connue. Elle a été surpassée en 2016, quand Pascal Oesch, de l'université Yale, a découvert une galaxie 20 millions d'années plus ancienne, cette fois avec le relevé *Candels* (*Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey*), une observation par *Hubble* de zones relativement vides du ciel, sans l'aide de lentilles gravitationnelles.

Après les succès du relevé *Clash*, j'ai aidé à convaincre le directeur du télescope *Hubble* de l'époque, Matt Mountain, d'inclure les amas galactiques dans le prochain grand programme d'observation du télescope spatial, nommé *Frontier Fields* et dirigé par Jennifer Lotz, de l'Institut des sciences du télescope spatial. Ce projet suivait les pas des précédents programmes de champs profonds de *Hubble* (tels que *Hubble Deep Field*), qui scrutaient de petites zones du ciel pendant plusieurs jours. Ces premiers projets ciblaient les zones du ciel les plus vides possible, sans lumière brillante de galaxies «proches» (à seulement quelques milliards d'années-lumière de la Terre) qui nous bloqueraient la vue sur l'Univers plus lointain.

La première image du champ profond de *Hubble*, qui combinait 342 expositions réalisées sur dix jours en 1995, fut une révélation : dans une minuscule fraction angulaire de ciel vide, pas plus grande qu'un grain de sable tenu à bout de bras, nous avons découvert quelque

3 000 galaxies. Par la suite, le *Champ profond de Hubble Sud* et le *Champ ultra-profond* ont pris le même soin d'éviter les régions comportant des galaxies proches.

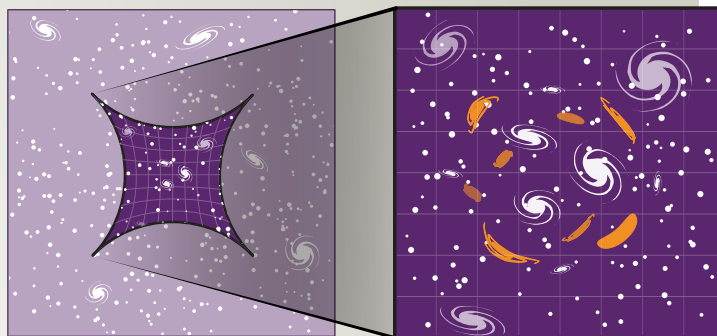
Le projet *Frontier Fields* a observé six régions relativement vides, s'inscrivant dans la continuité des précédents programmes de champs profonds. Mais il a aussi rompu avec cette approche en obtenant des images profondes de six régions contenant certaines des plus fortes concentrations de galaxies distantes de 3 à 5 milliards d'années-lumière, afin de profiter d'effets de lentilles gravitationnelles. En amplifiant la puissance de détection de *Hubble* et de *Spitzer* avec les lentilles gravitationnelles, les champs de *Frontier Fields* ont révélé les galaxies les plus petites et les plus lointaines jamais observées.

SCRUTER DES AMAS GALACTIQUES

Après *Clash*, et avec *Frontier Fields* en cours, il n'était pas évident que les astronomes approuveraient une nouvelle demande de temps d'observation sur le télescope *Hubble* afin de scruter des amas galactiques. Mais j'avais remarqué que de nombreux amas massifs, récemment découverts, n'avaient jamais été observés par *Hubble* dans l'infrarouge proche, une plage de longueurs d'onde intéressante pour chercher les galaxies lointaines. En effet, à cause de l'expansion de l'Univers, la longueur d'onde de la lumière des objets lointains subit un étirement et augmente : c'est l'effet de *red-shift* ou décalage vers le rouge. Or les étoiles de galaxies jeunes émettraient beaucoup dans l'ultraviolet, un rayonnement qui arriverait jusqu'à nous dans l'infrarouge proche. Ces amas de galaxies constituaient donc de potentielles lentilles que nous n'avions pas encore exploitées pour traquer des galaxies dans l'Univers âgé de moins d'un milliard d'années.

DEUX STRATÉGIES

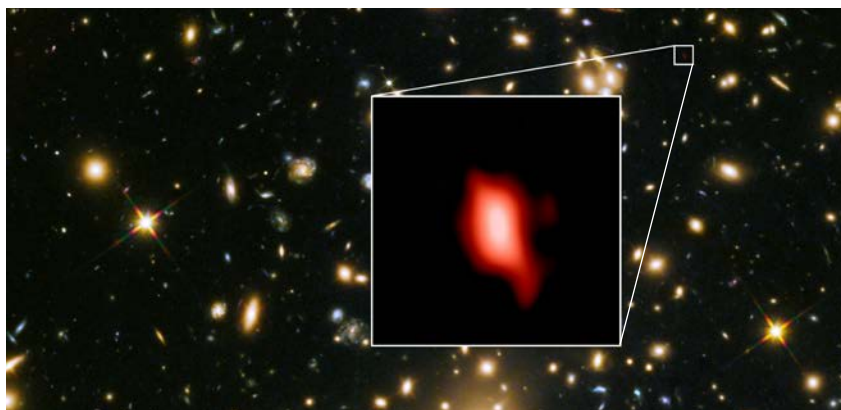
Les astronomes adoptent deux approches différentes pour rechercher des galaxies lointaines. La première consiste à observer longtemps une zone apparemment vide du ciel, de façon à collecter de la lumière d'objets peu lumineux. Une autre option est de scruter des zones comportant un amas galactique massif qui joue le rôle de lentille gravitationnelle, ce qui amplifie la lumière venant d'un éventuel objet lointain situé en arrière-plan. Si l'on compare ces deux méthodes, le champ de vision est plus petit dans le cas de la lentille, du fait de l'effet de zoom ; et l'image est déformée. Néanmoins, cette technique est plus efficace pour traquer les premières galaxies.



Zone du ciel comportant un amas galactique massif

Galaxies lointaines apparaissant grâce à l'effet de lentille gravitationnelle

LES PREMIÈRES GALAXIES VERS 200 MILLIONS D'ANNÉES APRÈS LE BIG BANG



Grâce à l'amplification de la lumière par une lentille gravitationnelle, l'observatoire *Alma* a observé le contenu en oxygène (en rouge, dans le zoom) de la galaxie lointaine MACSJ1149-JD1.

Déterminer à quelle époque les premières galaxies se sont formées est un des défis de l'astronomie moderne.

Pour y parvenir, les chercheurs suivent deux stratégies. L'une consiste à simuler l'histoire de l'Univers au moyen d'ordinateurs très puissants, l'autre est de tenter de repousser toujours plus loin les frontières de l'Univers observable, grâce aux grands télescopes.

D'après les simulations numériques décrivant la formation des galaxies et des grandes structures dans l'Univers primordial, les galaxies se seraient formées au sein de grands nuages (ou halos) de matière noire assez massifs (d'environ 10^{12} fois la masse du Soleil) où des étoiles seraient nées à un rythme élevé. Or, du fait de la croissance progressive des halos, ces derniers n'ont atteint la taille nécessaire qu'à partir de 200 millions d'années après le Big Bang.

À partir de ce moment, les premières étoiles auraient émis surtout de la lumière ultraviolette. Mais, du fait de l'expansion de l'Univers, ce rayonnement a subi un décalage vers des longueurs d'onde plus grandes et nous parvient sur Terre dans l'infrarouge proche. Or actuellement, aucun instrument, au sol ou dans l'espace, ne permet d'étudier avec une bonne résolution ce domaine de longueurs d'onde. Il est donc difficile de confirmer quand les toutes premières galaxies se sont formées.

Les galaxies les plus lointaines connues à ce jour (UDFj-39546284 et GN-z11) ont été repérées avec le télescope spatial *Hubble* à une longueur d'onde

de 1,6 micromètre, ce qui correspondrait à une lumière émise environ 400 millions d'années après le Big Bang. Elles sont donc un peu plus anciennes que la galaxie SPT0615-JD évoquée par Dan Coe.

S'il est impossible, pour l'instant, d'observer directement la naissance des premières galaxies, on peut estimer la période à laquelle elles se sont formées. Pour ce faire, on détermine l'âge de l'Univers où l'on observe une galaxie lointaine, grâce au décalage vers le rouge de sa lumière, puis on estime l'âge des plus vieilles étoiles qu'elle contient. Les étoiles âgées émettent surtout de la lumière dans le domaine optique, qui

En analysant la lumière émise par les étoiles vieilles, nous avons estimé quand la galaxie est née

nous parvient dans l'infrarouge, du fait de l'expansion de l'Univers. Or l'atmosphère terrestre est opaque au rayonnement infrarouge, il est donc nécessaire d'aller dans l'espace. L'observatoire spatial *Spitzer* est le télescope le plus performant, à ce jour, pour étudier le rayonnement infrarouge. Cependant, sa sensibilité limite la détection aux galaxies les plus brillantes. Ainsi, cette technique ne s'applique qu'aux galaxies les plus massives ou à celles dont la lumière a été fortement amplifiée par l'effet de lentille gravitationnelle.

Grâce à cette approche, nous avons récemment découvert l'une des galaxies les plus lointaines connues à ce jour, MACSJ1149-JD1, que nous observons telle qu'elle était quand l'Univers était âgé de 550 millions d'années (près de 4% de son âge actuel). Cette galaxie repérée sur les images du télescope spatial *Hubble* comporte 1000 fois moins d'étoiles que la Voie lactée. Elle est cependant dix fois plus brillante qu'elle n'est réellement, en raison de la présence de l'amas de galaxies MACSJ1149+2223 le long de la ligne de visée, qui agit comme une lentille gravitationnelle. Grâce, avec le *VLT* et *Alma*, à la mesure précise du décalage spectral de cette galaxie, et à celle de la quantité de lumière reçue en infrarouge, mes collègues et moi avons estimé quand la galaxie est née. Nous avons estimé que la formation de la galaxie remonte à environ 260 millions d'années après le Big Bang.

L'étude de MACSJ1149-JD1 constitue la première preuve observationnelle de l'existence des galaxies à une époque en accord avec celle prédite grâce aux simulations numériques.

Le futur télescope spatial *James-Webb Space Telescope*, qui sera lancé en mars 2021, repoussera les limites de nos observations. Grâce à la haute sensibilité des détecteurs infrarouges du télescope et la grande taille de son miroir (6,5 mètres de diamètre), nous mesurerons l'âge de galaxies encore plus lointaines et repérerons ces galaxies quelques millions d'années seulement après leur formation.

NICOLAS LAPORTE

University College, Londres, Royaume-Uni

> J'avais trouvé ces amas dans un catalogue constitué en 2015 par les chercheurs travaillant sur les données de l'observatoire spatial *Planck*, de l'Agence spatiale européenne. Le projet *Planck* est surtout connu pour ses cartes globales et détaillées du fond diffus cosmologique, le premier rayonnement émis dans l'Univers, alors âgé de seulement 380 000 ans. Mais les données de *Planck* ont aussi contribué à établir un catalogue de plus de 1 000 amas galactiques massifs, révélés par les distorsions qu'ils provoquaient dans les cartes du fond diffus.

UN PROGRAMME AMBITIEUX

La plupart de ces amas étaient déjà connus, mais beaucoup ont aussi été découverts par ce biais. Je me suis ainsi aperçu que l'amas le plus massif du catalogue, Abell 2163, n'avait été observé par *Hubble* qu'en longueurs d'onde visibles, et pas dans l'infrarouge proche. Le deuxième amas le plus massif (PLCK G287.0+32.9, découvert par *Planck*) constituait une excellente lentille gravitationnelle, mais *Hubble* n'avait pas encore tourné son regard vers lui.

J'ai ainsi dressé une liste de 41 amas massifs qui n'avaient pas été observés dans l'infrarouge proche, et, avec des collègues, nous avons rédigé une proposition d'observation. Nous avons demandé à utiliser *Hubble* sur l'équivalent de 5% de son temps réservé aux projets de cette année-là, ce qui correspondait à plus de 100 heures d'observation. Mais notre proposition était loin d'être la seule à avoir été soumise, et la compétition était rude. Des astronomes du monde entier se sont réunis à Baltimore pour décider des projets à retenir. En juin 2015, notre demande a été acceptée, un des plus gros programmes d'observation des 23 années d'exploitation de *Hubble*.

Le relevé *Relics* a observé chacun des 41 amas avec le détecteur infrarouge de la caméra WFC3/IR (*Wide Field Camera 3*). Nous les avons aussi observés dans le visible (si cela n'avait pas déjà été fait) à l'aide de la caméra ACS (*Advanced Camera for Surveys*). Les images à plus haute résolution de l'ACS nous ont aidés à mesurer les propriétés de la lentille gravitationnelle de chaque amas et à estimer le grossissement des lointaines galaxies découvertes dans les images de WFC3/IR. Nous avons observé à sept longueurs d'onde différentes comprises entre 400 et 1 700 nanomètres. En examinant des caractéristiques connues de la lumière, comme la longueur d'onde précise qu'absorbe l'hydrogène neutre (dans lequel baignent les galaxies de l'Univers jeune), nous sommes en mesure d'estimer de combien la lumière de la galaxie a été décalée vers le rouge, et donc d'estimer l'éloignement de la galaxie.

On nous a également alloué 945 heures de temps de télescope sur *Spitzer*. Ses données

dans l'infrarouge fournissent un recensement plus complet des étoiles dans les premières galaxies, nous permettant de mesurer leur masse stellaire et aussi de confirmer les estimations de distance obtenues grâce à *Hubble*.

En 2017, Brett Salmon a découvert la galaxie SPT0615-JD dans les données du relevé *Relics*, une galaxie particulièrement rouge. Le caractère unique de cette galaxie n'était pas évident au premier coup d'œil. En effet, les galaxies peuvent paraître rouges pour diverses raisons. Certaines ont un fort décalage vers le rouge car elles sont très lointaines. Mais d'autres sont enveloppées de nuages de poussière, qui absorbent la lumière bleue et la réémettent sous la forme de rayon-



La galaxie SPT0615-JD date de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années



nement infrarouge, ce qui fait paraître les galaxies plus rouges qu'elles ne le sont vraiment. Et d'autres galaxies n'ont pas formé beaucoup de nouvelles étoiles, et les astres qui y restent sont des étoiles rouges de longévité importante. Les galaxies rouges peuvent aussi être une combinaison de tout cela: décalées vers le rouge, poussiéreuses et vieilles.

Les observations du télescope *Spitzer* entre 3 et 5 micromètres de longueur d'onde sont très utiles pour nous aider à distinguer les galaxies lointaines décalées vers le rouge des galaxies intrinsèquement rouges, qui apparaîtraient encore plus brillantes dans les données de *Spitzer*. Nous avons initialement découvert trois galaxies (dont SPT0615-JD) dans les images de *Hubble* qui semblaient avoir un décalage vers le rouge (noté z) d'environ 10, datant de l'époque où l'Univers avait moins de 500 millions d'années, soit il y a plus de 13 milliards d'années. Mais l'analyse des observations de *Spitzer* a révélé que deux d'entre elles avaient plutôt un décalage vers le rouge d'environ 2, correspondant à l'époque où l'Univers avait déjà 3 milliards d'années (presque un quart de son âge actuel). La galaxie SPT0615-JD a survécu à l'analyse de *Spitzer*, et est restée un candidat probable à $z=10$.

Ce résultat a été obtenu en combinant l'analyse sur les données de *Hubble* de Brett Salmon

LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE OU REDSHIFT

Lorsqu'une source s'éloigne de l'observateur (parce qu'elle se déplace ou parce que l'Univers est en expansion), les longueurs d'onde de sa lumière sont augmentées, et ainsi décalées vers le rouge. Si λ_0 est la longueur d'onde émise par la source, et λ_{obs} celle mesurée par un télescope, on définit le redshift :

$$z = \frac{(\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0)}{\lambda_0}$$

Dans le cas de l'expansion de l'Univers, le redshift est relié aux distances dans le cosmos.

et une analyse sur celle de *Spitzer* par Victoria Strait, de l'université de Californie à Davis. Nous avons trouvé que le spectre lumineux de SPT0615-JD diminue à partir de 1,34 micromètre, et aucune lumière de longueur d'onde inférieure n'a été détectée en provenance de cette source. Cette part manquante du spectre s'explique par le fait que les atomes d'hydrogène du gaz dans l'Univers primordial ont absorbé cette lumière et se sont ionisés en perdant leur électron. La rupture brutale dans le spectre de SPT0615-JD nous permet de mesurer la distance de l'objet. Bien que nous observions ce décrochement autour de 1,34 micromètre, nous savons que l'hydrogène neutre s'ionise en absorbant de la lumière de longueur d'onde inférieure à 0,1216 micromètre. La différence provient du décalage vers le rouge lié à l'expansion de l'Univers. Nous observons SPT0615-JD à un décalage vers le rouge de 10, c'est-à-dire quand l'Univers n'avait que 3,5% de son âge actuel.

Cette datation fait de SPT0615-JD l'une des plus anciennes galaxies que nous connaissons.

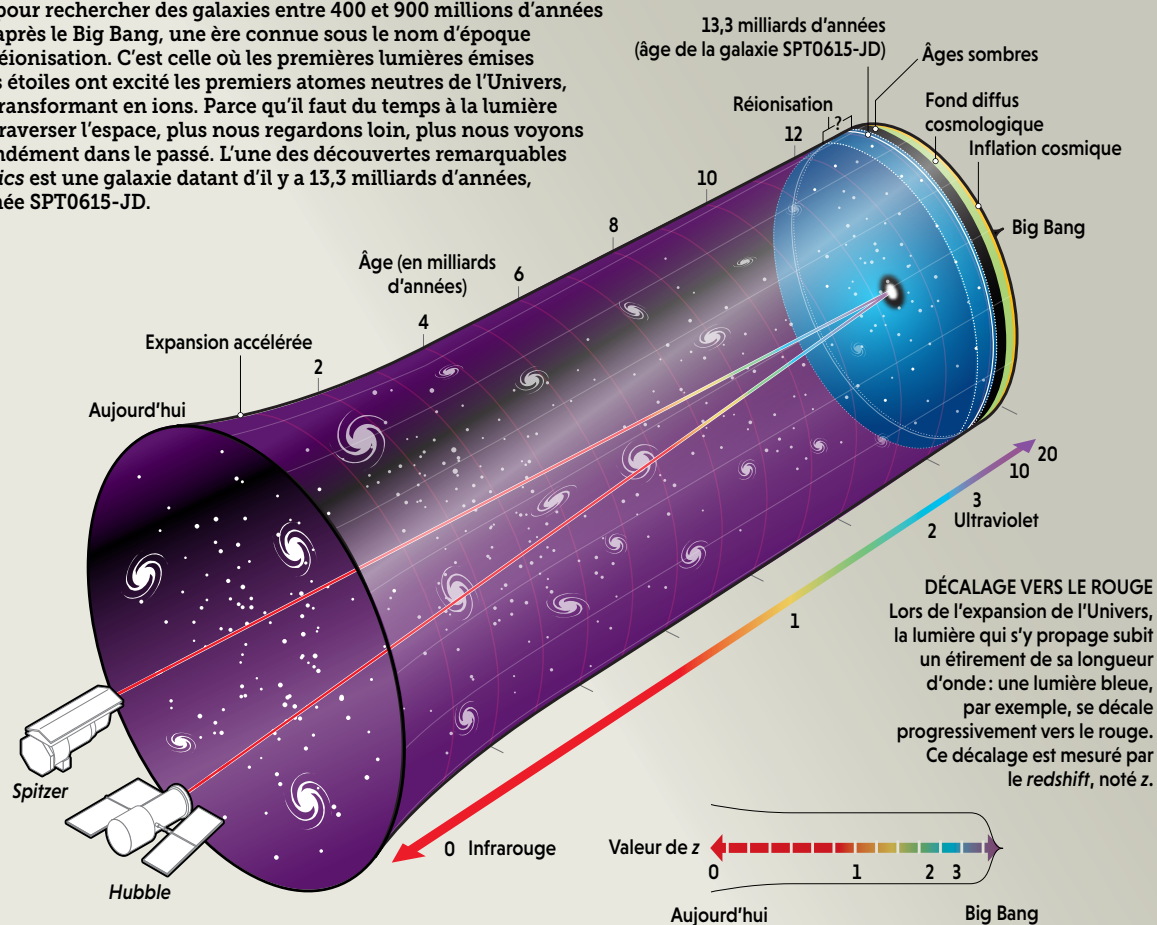
On connaît deux autres galaxies légèrement plus lointaines, observées quand l'Univers avait 400 millions d'années (voir l'encadré page 65). Mais dans les images de *Hubble*, ces galaxies sont de simples points infrarouges, trop petits pour discerner le moindre détail de leur structure interne. La galaxie SPT0615-JD est spéciale: sa lumière a été étirée et amplifiée par un effet de lentille gravitationnelle, ce qui nous offre l'aperçu le plus détaillé à ce jour d'une galaxie aussi ancienne.

Les observations de cette galaxie sont loin d'être terminées. D'après Rachel Paterno-Mahler, de l'université de Californie à Irvine, nous devrions voir des images multiples (bien que très pâles) produites par l'effet de lentille gravitationnelle, ce qui n'a pas encore été le cas.

Nous avons aussi un programme d'observation de cette galaxie avec *Alma* (*Atacama Large Millimeter Array*, grand réseau d'antennes millimétriques de l'Atacama), dont nous attendons qu'il confirme notre mesure de la distance et qu'il y observe la présence d'oxygène, ce qui ➤

CHRONOLOGIE COSMIQUE

Le relevé *Relics* a utilisé les télescopes spatiaux *Hubble* et *Spitzer* pour rechercher des galaxies entre 400 et 900 millions d'années après le Big Bang, une ère connue sous le nom d'époque de la réionisation. C'est celle où les premières lumières émises par les étoiles ont excité les premiers atomes neutres de l'Univers, les retransformant en ions. Parce qu'il faut du temps à la lumière pour traverser l'espace, plus nous regardons loin, plus nous voyons profondément dans le passé. L'une des découvertes remarquables de *Relics* est une galaxie datant d'il y a 13,3 milliards d'années, nommée SPT0615-JD.



> constituerait la détection la plus ancienne d'un élément aussi lourd. Et nous allons proposer des observations avec le prochain observatoire vedette de la Nasa, le *JWST* (*James-Webb Space Telescope*). Nous espérons alors obtenir des images détaillées de la dynamique interne de la galaxie, mesurer sa contribution à la réionisation et déterminer sa composition chimique, à savoir s'il s'agit uniquement d'hydrogène et d'hélium ou si la galaxie est déjà enrichie en éléments plus lourds.

La galaxie SPT0615-JD a été la découverte la plus remarquable de *Relics*, mais nous avons trouvé près de 300 autres galaxies dans le premier milliard d'années de l'Univers, dont l'ancienneté reste à confirmer. Parmi elles se trouvent les galaxies les plus brillantes datant de ces temps anciens, ce qui nous permettra de les étudier en détail.

LE CHAPITRE MANQUANT DE L'HISTOIRE COSMIQUE

Les galaxies anciennes que nous trouvons grâce à *Relics* nous aident à remplir une des pages blanches du grand livre de l'histoire du cosmos. Dans le cadre du modèle standard cosmologique, l'Univers a débuté par un Big Bang suivi aussitôt d'une période d'inflation durant laquelle l'espace a gonflé à grande vitesse. Environ 380 000 ans après sa naissance, l'Univers s'est assez refroidi pour que les premiers atomes se forment et que la lumière se propage librement. Nous voyons aujourd'hui les traces de cet épisode avec le fond diffus cosmologique.

Mais après, l'histoire de l'Univers souffre d'un trou de près de 400 millions d'années. Nous n'avons jamais observé le moindre objet correspondant à cette période. Ces 3% de l'histoire cosmique nous sont inconnus. Mais nous savons qu'il s'y est passé beaucoup de choses. Les premières étoiles se sont formées peut-être 100 millions d'années après le Big Bang. Ensuite, nous pensons que les étoiles ont commencé à s'agglutiner et à former *in fine* les premières galaxies. La lumière de ces galaxies a commencé à bombarder les atomes d'hydrogène environnant, les ionisant et libérant leurs électrons.

Comprendre comment ce processus s'est déroulé en étudiant ces galaxies est crucial pour remplir les pages manquantes de l'histoire de nos origines. Le relevé *Relics* et les projets qui l'ont précédé (comme *Clash*, *Candels* et *Frontier Fields*) avancent à grands pas, mais nous attendons un véritable bond en avant avec le *JWST*, qui prendra son envol en 2021. Cet observatoire spatial sera l'outil le plus puissant de l'humanité pour sonder les temps les plus reculés. Équipé d'un plus grand miroir, sensible à des longueurs d'onde plus importantes que les télescopes précédents, il verra des galaxies plus lointaines et moins

brillantes avec une meilleure résolution. Et il sera capable de déterminer la masse et la composition de ces galaxies, ainsi que leur contribution à la réionisation.

Les lentilles gravitationnelles nous ont été d'une aide précieuse pour découvrir des galaxies lointaines avec les télescopes existants, et je ne doute pas que cette stratégie, combinée à la puissance du *JWST*, poussera les découvertes encore plus loin, jusqu'à des décalages vers le rouge encore plus grands.

Les premières étoiles se seraient formées 100 millions d'années après le Big Bang

Plus nous regardons loin dans le passé, plus nous constatons que les petites galaxies y représentent une part importante du total. Si cette tendance se poursuit dans les 400 premiers millions d'années, l'avantage que confèrent les lentilles gravitationnelles n'en sera que multiplié. Sur la base des estimations actuelles, je pense que les lentilles seront la clé de la découverte des toutes premières galaxies avec le *JWST*.

Ce télescope spatial verra sûrement des galaxies à 300 millions d'années après le Big Bang, et, avec les lentilles gravitationnelles, nous espérons voir des galaxies dans l'Univers âgé de moins de 200 millions d'années – si tant est que des galaxies se formaient déjà à une époque aussi reculée.

L'inconvénient du *JWST* est sa durée de vie, entre 5 et 10 ans, qui est relativement courte comparée aux 28 ans de *Hubble*. Le *JWST* aura assez de carburant pour maintenir son orbite pendant une décennie. Et il évoluera à environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, soit beaucoup trop loin pour que des astronautes puissent assurer son ravitaillement et son entretien, comme cela a été le cas plusieurs fois avec *Hubble*. Nous devons donc être opérationnels très vite pour traquer les anciennes galaxies. Le relevé *Relics* nous permettra d'optimiser la brève existence du *JWST*, parce qu'il a déjà identifié certaines des galaxies anciennes les plus intéressantes à observer en détail avec ce nouveau télescope, ainsi que les régions du ciel comportant de fortes lentilles, où le *JWST* ne manquera pas de trouver de nouvelles galaxies. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Hashimoto et al., **The onset of star formation 250 million years after the Big Bang**, *Nature*, vol. 557, pp. 392-395, 2018.

B. Salmon et al., **RELICS : a candidate z~10 galaxy strongly lensed into a spatially resolved arc**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 864(1), article L22, 2018.

M. Lemonick, **La fin de l'âge sombre**, *Pour la Science* n° 441, juillet 2014.

Qu'a fait découvrir la mission américano-européenne *Cassini-Huygens*, qui a exploré Saturne et ses satellites de 2004 à 2017 ? En quoi consiste la mission européenne *Juice*, qui sera lancée en 2022 pour atteindre Jupiter et ses satellites en 2030 ? Suivez l'actualité de la recherche spatiale présentée par ceux qui la font, à travers cette séance de l'Académie de l'air et de l'espace.

Avec

Avec Jean-Pierre Lebreton, responsable mission *Huygens* à l'Esa, et Olivier Witaske, chef du projet *Juice* à l'Esa.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE

POUR LA
SCIENCE

Palais

DÉCOUVERTE

explorer les géantes gazeuses

conférences accès gratuit

jeudi 7 février
— 14h

cité

sciences
et industrie

piloter un objet par l'activité cérébrale

conférences accès gratuit

mercredi 13 février
— 18h

Imaginer le mouvement pour le faire réaliser par un avatar technique, c'est l'un des défis des interfaces cerveau-machine. Les applications cliniques seront importantes, notamment pour la mobilité des personnes tétraplégiques. Des questions éthiques se posent aussi.

Avec

Alain Berthoz, Collège de France,
Guillaume Charvet, CEA, Anatole Lécuyer, INRIA,
Fabien Lotte, INRIA, Jérémie Mattout, INSERM.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE

POUR LA
SCIENCE

L'ESSENTIEL

> Certaines espèces, telles que des pissenlits, des escargots et des poissons, s'adaptent de façon surprenante aux contraintes des milieux urbains.

> Leur évolution est souvent plus rapide qu'elle ne le serait dans d'autres types d'écosystèmes.

> Comme les pressions de sélection sont similaires d'une ville à l'autre, certaines espèces pourraient devenir de plus en plus semblables d'un bout à l'autre de la planète.

> En revanche, beaucoup d'espèces ne pourront jamais s'adapter aux milieux urbains et nécessitent une protection.

L'AUTEUR



MENNO SCHILTHUIS
spécialiste de biologie
de l'évolution, professeur
à l'université de Leyde et chercheur
au centre de biodiversité Naturalis,
aux Pays-Bas

Pissenlit des villes, pissenlit des champs

Bonne nouvelle : certaines espèces d'animaux et de plantes s'adaptent à l'environnement urbain, souvent avec une étonnante rapidité.
Mauvaise nouvelle : l'urbanisation galopante risque aussi de conduire à l'extinction un grand nombre d'espèces.

«**F**iou!» s'exclame mon ami Franck en lançant ses mains droit vers le ciel, manquant de renverser son verre. Nous sommes assis dans mon jardin à Leyde, aux Pays-Bas. Franck me mime avec entrain le faucon pèlerin qui, chaque jour, file à vive allure devant la fenêtre de son bureau à l'hôpital pour rejoindre son perchoir en haut du bâtiment, un pigeon fraîchement tué entre les serres.

Les faucons pèlerins font partie de ces nombreux oiseaux qui ont récemment adopté un mode de vie urbain. Chassant d'habitude les oiseaux de taille moyenne aux abords des falaises, ils ont troqué peu à peu leurs escarpements rocheux pour des clochers d'église, cheminées et gratte-ciel, et les geais pour des pigeons. Dans certaines régions d'Europe et d'Amérique du Nord, la plupart des faucons pèlerins nichent dans les villes.

Ces ressemblances fortuites entre environnements naturels et milieux urbains attirent certaines espèces animales et végétales dans les métropoles. Les blattes se sont aisément accommodées à nos demeures sombres et humides. Les abords des routes salées en hiver conviennent parfaitement aux plantes de bords de mer. Les rats laveurs, avec leurs petites pattes avant aussi agiles que des mains, manipulent avec adresse les poubelles qui parsèment les trottoirs.

Homo sapiens a établi d'immenses lieux de vie sur presque tous les continents. En 2030, plus de 600 villes accueilleront plus de un million d'habitants. Les humains constituent la première espèce à avoir produit des conditions de vie pour un nombre aussi élevé d'autres espèces, et ce à une échelle aussi vaste. Mais quelque chose de plus surprenant encore est en train de se dérouler sous nos yeux. La ville, avec ses immeubles de briques, de verre et d'acier, ses artères où circulent des milliers de ➤