

DURÉE LIBRE

L'ESSENTIEL

> S'il existe dans la Voie lactée des civilisations technologiquement avancées, elles pourraient se propager très vite à travers la Galaxie. Mais il faut alors expliquer pourquoi la Terre semble n'avoir pas été visitée par des extraterrestres.

> Les réponses habituelles (nous sommes seuls, le voyage interstellaire est impossible, les extraterrestres se cachent...)

reposent toutes sur des hypothèses peu plausibles.

> Une autre explication serait que la colonisation galactique se fait par vagues, et que nous vivons actuellement dans une région restée à l'écart de l'exploration interstellaire.

L'AUTEUR



CALEB SCHARF
directeur du centre d'astrobiologie de l'université Columbia, aux États-Unis, et auteur de plusieurs ouvrages, dont *The Copernicus Complex* (2014) et *The Zoomable Universe* (2017)

Seuls dans un archipel galactique?

S'il existait des extraterrestres capables d'effectuer des voyages interstellaires, ils devraient se propager rapidement dans toute la Voie lactée. Las ! Il n'y a aucune trace de leur passage sur notre planète... Explication possible : le Système solaire serait trop éloigné de leurs grands axes de migration.

Le 15 juillet 1790, à la suite de la fameuse mutinerie du *Bounty*, neuf marins, dix-huit passagers tahitiens et un bébé débarquaient sur l'île de Pitcairn. Perdue dans le sud de l'océan Pacifique, à plusieurs centaines de kilomètres des îles les plus proches, Pitcairn est l'un des lieux habitables les plus isolés de la planète.

Avant l'arrivée des mutins du *Bounty*, l'île avait été occupée pendant plusieurs siècles par des populations venues de Polynésie, puis désertée pendant près de trois cents ans. À la fin du xv^e siècle, un appauvrissement des ressources naturelles et des conflits avec d'autres îles lointaines, qui ont perturbé les liens de commerce et les voies de ravitaillement,

auraient mis un terme à l'occupation humaine de Pitcairn, laissant l'île inhabitée jusqu'à l'arrivée du *Bounty* en 1790. Étonnamment, aucun autre navire n'a jeté l'ancre à Pitcairn pendant dix-huit ans, même si les colons ont consigné avoir vu des vaisseaux passer au loin.

L'histoire de Pitcairn n'est qu'un exemple extrême de la dynamique inhabituelle de l'occupation humaine du sud du Pacifique. La Polynésie, la Micronésie et la Mélanésie englobent des dizaines de milliers d'îles éparpillées sur des millions de kilomètres carrés d'océan. La plupart ne sont guère plus que de modestes protubérances rocheuses ou coralliennes. Et les lieux habitables ne sont d'ailleurs pas tous occupés à tout moment donné. Néanmoins, ils représentent un vaste >



Peut-on comparer la Galaxie
à un vaste océan où les espèces
technologiquement avancées
voyageraient comme les marins
voguant d'île en île ?

> potentiel d'implantation pour qui serait prêt à traverser les vastes et profondes étendues marines de la planète.

Le parallèle entre cet environnement sur Terre et notre voisinage galactique est frappant. Dans la Voie lactée, il y a environ 300 milliards d'étoiles. Les observations récentes et en cours, comme celles du télescope spatial *Kepler* de la Nasa, suggèrent que dans cet océan de corps stellaires il y aurait plus de 10 milliards de petits mondes rocheux présentant des conditions de surface hospitalières, grâce à des configurations orbitales propices.

DE PITCAIRN À LA VOIE LACTÉE

Comme les îles de la Terre, ces exoplanètes et ces exolunes seraient en mesure d'héberger des organismes vivants, qui y sont nés ou y ont migré. Elles constitueraient autant d'escaliers potentiels pour une espèce déterminée à voyager à travers l'espace interstellaire. Cette analogie est bien plus riche qu'on ne peut le penser.

De la même façon que les peuples du Pacifique ont essaimé sur des milliers de kilomètres d'océan à bord de simples embarcations avançant à la vitesse de quelques nœuds seulement, une dispersion à travers la Galaxie est envisageable, même si les contraintes sont

parfois très différentes (distances à parcourir, possibilité de survie en mer et dans l'espace).

Selon une anecdote célèbre, en 1950, en se rendant compte à quel point il pourrait être facile de parcourir la Galaxie, le physicien italien Enrico Fermi se serait exclamé au cours d'un déjeuner avec des collègues : « Mais où sont-ils tous ? » – ce « tous » désignant les espèces qui explorent l'espace. La célèbre question s'est développée par la suite pour donner le non moins célèbre (bien qu'assez mal nommé) « paradoxe de Fermi » : à moins que les espèces technologiquement avancées soient excessivement rares, elles devraient à présent s'être répandues pratiquement partout dans la Galaxie, et pourtant nous n'en voyons pas la moindre trace. Fermi, réputé pour sa capacité

LA PERCOLATION, UN MODÈLE DE COLONISATION GALACTIQUE

Dès 1950, Enrico Fermi et d'autres ont constaté qu'*a priori*, une espèce extraterrestre ayant développé les moyens technologiques de voyager d'une étoile à l'autre devrait coloniser la Voie lactée en quelques millions d'années.

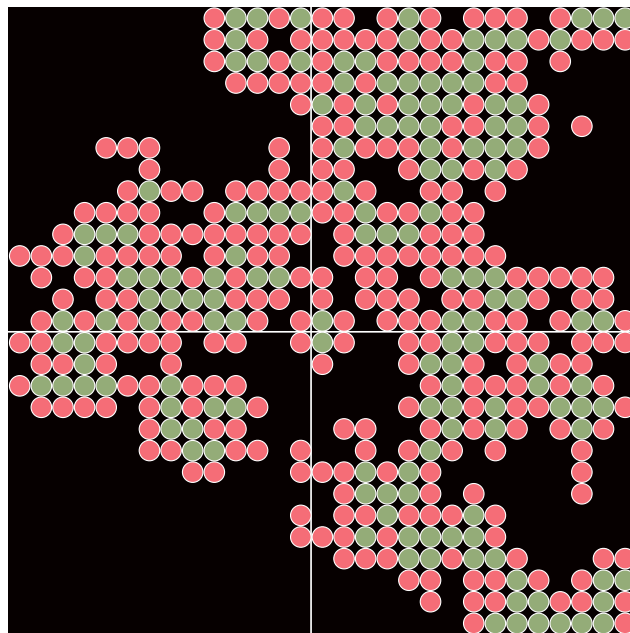
Il existe diverses façons de modéliser le processus de migration galactique. Un exemple classique s'inspire du phénomène physique de percolation, qui désigne l'écoulement d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable, à l'image de la préparation du café où l'eau traverse le café moulu. La modélisation de la percolation met en évidence un seuil critique, dépendant de différents paramètres du

système, au-dessous duquel la transmission du fluide devient trop difficile et s'arrête.

En 1998, Geoffrey Landis, du centre de recherche Lewis de la Nasa, a proposé d'utiliser la théorie de la percolation pour décrire la propagation d'espèces extraterrestres dans la Galaxie. Avec cette description, la colonisation de la Voie lactée ne s'effectue pas selon un unique mouvement homogène, mais selon des branches plus ou moins actives dont la propagation s'interrompt parfois.

Le modèle repose sur deux hypothèses. Premièrement, les voyages interstellaires sont possibles, mais difficiles. Il existe donc un horizon, une distance maximale pour qu'un voyage direct soit entrepris. Dans le volume défini par cet horizon, on dénombre en moyenne N systèmes habitables.

Deuxième hypothèse : à cause de la distance qui sépare une colonie de sa planète d'origine et des moyens de communication limités, chaque colonie développe une culture propre. Celle-ci a alors une



Geoffrey Landis a simulé le mécanisme d'expansion dans un réseau tridimensionnel régulier avec $N = 6$. Le seuil critique est alors $P_c = 0,311$. En prenant $P = 1/3$, juste au-dessus du seuil critique, on obtient des régions colonisées (en vert) et non colonisées (en rose).

probabilité P de vouloir continuer à coloniser la Galaxie et une probabilité $(1 - P)$ d'être sédentaire, car elle considère que le coût et le besoin en ressources pour mener à bien ce projet sont excessifs. Comme dans la théorie de la percolation, il existe alors une valeur critique P_c de la probabilité au-dessous de laquelle la conquête de la Galaxie s'arrête au bout de quelques colonies. Pour P supérieur à P_c , seules des petites régions de la Voie lactée ne seront pas occupées. Si P est proche de P_c on

obtient des zones colonisées et des zones non visitées de tailles arbitraires. De la même façon que Caleb Scharf et ses collègues, mais avec des hypothèses différentes, on obtient une colonisation hétérogène de la Galaxie, ce qui expliquerait le paradoxe de Fermi. Mais comme avec toutes les explications avancées pour résoudre ce paradoxe, la principale difficulté est la justification des hypothèses utilisées.

SEAN BAILLY
Pour la Science

à faire de rapides estimations, grâce à des calculs de tête, s'était rendu compte que la Voie lactée pouvait être colonisée en quelques millions d'années seulement.

En 1975, l'astrophysicien américain Michael Hart effectua la première étude quantitative et montra que ce problème n'était pas aussi simple qu'on pouvait le penser. Le chercheur est parti d'une observation indiscutable (pour la plupart des gens sensés), qu'on nomme la « constatation A » de Hart : l'absence d'extraterrestres sur la Terre aujourd'hui. Il en a conclu qu'aucune autre civilisation technologiquement avancée n'existe actuellement (ou n'a existé) dans la Galaxie. La clé de cette affirmation, comme avec l'idée initiale de Fermi, repose sur le temps relativement court qu'il faudrait pour qu'une

stellaires et leurs planètes deviennent habités, s'ils ne l'étaient pas déjà, et servent alors de bases pour se lancer à la conquête de nouveaux systèmes. Pour les machines autorépliquantes, la principale limite à leur expansion serait la disponibilité d'énergie et de matières premières pour construire la génération suivante.

Ces approches très différentes illustrent la difficulté de tirer des conclusions claires et significatives sur la migration interstellaire. Sur quelles hypothèses construire un modèle de peuplement de la Galaxie ? Quels sont les postulats raisonnables ? S'appliquent-ils à des entités peut-être très différentes de nous ? Certaines hypothèses sont faciles à justifier, d'autres sont plus discutables. Par exemple, tous les scénarios font intervenir des estimations des performances de la technologie utilisée pour voyager dans l'espace. De plus, quand l'espèce prend part au voyage et ne se contente pas d'envoyer des émissaires robotiques, l'hypothèse la plus fondamentale est que les organismes vivants sont capables de survivre au voyage interstellaire.

D'un point de vue technique, voyager à seulement 10% de la vitesse de la lumière demande déjà des moyens très avancés, comme une propulsion par fusion nucléaire ou d'immenses voiles solaires poussées par des lasers très puissants. Un bouclier efficace est aussi indispensable pour protéger le vaisseau : à de telles vitesses, les atomes du gaz interstellaire provoquent une usure importante de la coque et de petits morceaux de roches suffisent pour détruire le vaisseau tant les collisions sont énergétiques. Il est donc plus sûr de voyager à des vitesses réduites, mais il faudrait alors des siècles ou des millénaires pour passer d'une étoile à une autre. Se pose alors la question de comment maintenir un équipage en vie et en bonne santé sur des durées dépassant largement celles des vies individuelles.

Mais les hypothèses les plus controversées tournent autour des questions de motivation, et des projections que nous faisons sur la longévité de civilisations entières et de leurs colonies. En 1983, à l'inverse de Michael Hart et Frank Tipler, les astrophysiciens Carl Sagan et William Newman ont considéré que l'absence d'indice n'est pas une preuve de la non-existence d'espèces intelligentes dans la Galaxie. Pour ces deux chercheurs, les hypothèses avancées sur le comportement de ces civilisations sont trop calquées sur celui des humains : ils parlent d'une « approche solipiste » de l'intelligence extraterrestre.

Par exemple, si une espèce extraterrestre ne voit tout simplement pas d'intérêt à atteindre d'autres étoiles, toute l'idée du peuplement galactique devient caduque. Mais, comme le souligne Jason Wright, de l'université d'État de Pennsylvanie, cette proposition souffre aussi ➤



La Voie lactée pourrait être colonisée en quelques millions d'années

espèce se propage sur les 100 000 années-lumière de rayon de la Voie lactée, même en utilisant des systèmes de propulsion modestes, beaucoup plus lents que la lumière.

En 1980, le physicien américain Frank Tipler se pencha aussi sur le problème. Il parvint à des conclusions similaires : des extraterrestres suffisamment motivés pourraient effectivement visiter l'intégralité de la Galaxie en quelques millions d'années. Étant donné que le Système solaire existe depuis 4,5 milliards d'années, et que la Voie lactée s'est formée il y a au moins 10 milliards d'années, cela laisse plus qu'assez de temps aux extraterrestres de la Galaxie pour atteindre tous ses mondes habitables.

L'INVASION DES SONDES AUTONOMES

Il est intéressant de noter les différences dans les scénarios des deux chercheurs. Michael Hart a fait l'hypothèse d'un processus de peuplement « en chair et en os » par une espèce biologique, tandis que Frank Tipler a imaginé des essaims de sondes automatiques et autorépliquantes – des « machines de von Neumann » – qui bondiraient d'étoile en étoile et se répandraient sans entrave. Dans la plupart des scénarios de colonisation, les systèmes

SEULS AU MILIEU DE LA FOULE

Pourquoi n'avons-nous pas vu d'autres civilisations dans la Voie lactée ? Parmi toutes les réponses possibles, la plus plausible est peut-être qu'il en existe, mais qu'elles ne se trouvent pas dans notre voisinage. Cette situation se produirait si l'exploration et la migration interstellaires sont partielles et se font par vagues, avec des civilisations spatiales qui s'étendent périodiquement en colonisant les systèmes planétaires les plus proches et les plus accueillants. En prenant en compte le mouvement des étoiles et une durée de vie finie pour chaque civilisation, des simulations de ce processus produisent des amas de systèmes occupés en continu, ainsi que des régions isolées très peu habitées. La Terre pourrait se situer dans l'une de ces dernières.

DIASPORAS GALACTIQUES

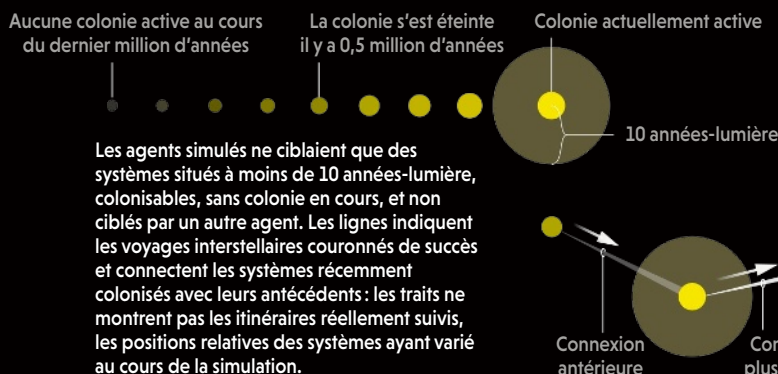
Cet instantané d'une simulation représente 10 millions d'années d'exploration interstellaire pour 10 000 systèmes colonisables dans un cube d'environ 464 années-lumière de côté. Les systèmes non colonisables sont 22 fois plus nombreux que les systèmes propices, mais ils ne sont pas représentés ici. À cette échelle, les étoiles se déplacent comme des particules d'un gaz, entravant ou facilitant le voyage interstellaire selon leurs trajectoires relatives. Les caractéristiques sont comparables à celles de notre région de la Galaxie. Les sondes lancées par des civilisations dispersées dans cet espace virtuel se déplacent à 3 000 kilomètres par seconde, 100 fois plus vite que la vitesse moyenne des étoiles environnantes.

● Chaque point représente la position actuelle d'un système colonisé ou colonisable.

Dans la simulation considérée ici, 6 948 systèmes habitables ont été visités par une sonde, mais seulement 403 ont abrité des colonies actives ; 3 052 systèmes colonisables n'ont pas été visités. Ce processus a donné naissance à 11 « empires » interstellaires distincts (comportant au moins 10 systèmes colonisés) et représentés chacun par une couleur différente pour indiquer leur origine commune.

Les autres vagues de colonisation, implantées sur moins de systèmes, sont représentées en gris.

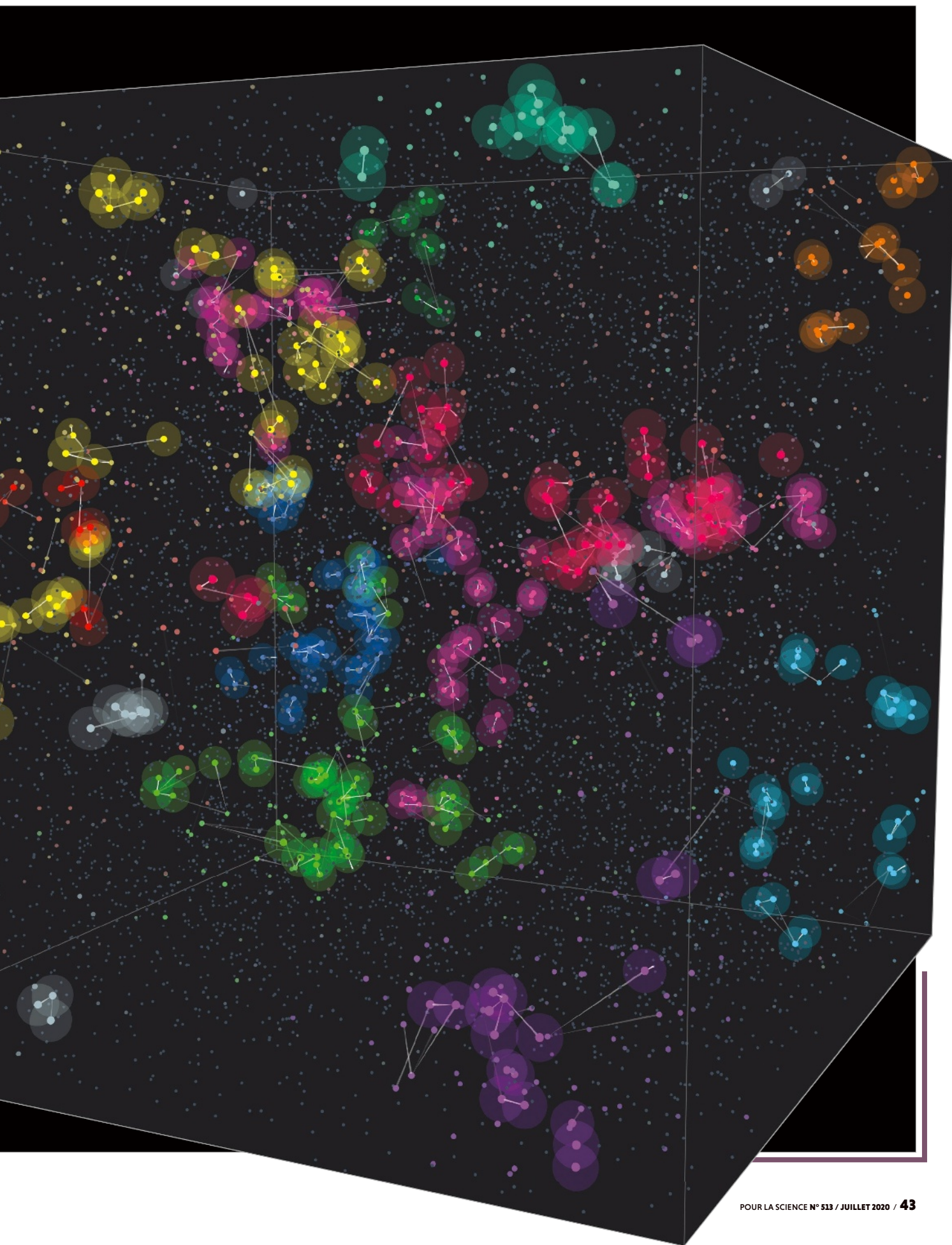
Les couleurs estompées indiquent des systèmes qui n'abritent plus de colonies actives : les colonies actuellement actives sont entourées de bulles semi-transparentes ayant un rayon de 10 années-lumière, qui indiquent la sphère théorique d'influence d'un système donné.



OÙ EST LA TERRE ?

Cette simulation reproduit les caractéristiques de notre voisinage galactique. Le Système solaire pourrait se trouver dans n'importe quelle région non colonisée de ce cube. Ces « vides » transitoires sont des régions où des mondes habitables resteraient hors de portée des civilisations voisines.





> d'une erreur de «raisonnement monoculturel». En d'autres termes, il est impossible de spéculer avec la moindre certitude sur le comportement d'une espèce entière comme si tous ses représentants avaient une unique façon de penser. Nous autres humains en sommes loin ! Et même si la grande majorité des civilisations spatiales putatives de la Voie lactée ne se lancent pas dans une diaspora galactique, il suffirait d'une seule culture plus aventureuse que les autres pour semer des signes de vie et de technologie à travers des centaines de milliards de systèmes stellaires.

DES EXPLICATIONS EN GÉNÉRAL TRÈS DIFFICILES À TESTER

En fait, l'histoire du paradoxe de Fermi est jalonnée de débats divers et variés sur ces hypothèses fondamentales, ainsi que d'une grande variété de «solutions» proposées. En général, ces explications sont très difficiles à tester. Bien que certaines fassent intervenir des idées assez simples, d'autres sont de la pure science-fiction.

Par exemple, il se pourrait que le coût en ressources pour être capable de traverser rapidement l'espace interstellaire soit trop élevé, même pour une espèce technologiquement très avancée. Cela limiterait drastiquement le nombre d'explorateurs et expliquerait la constatation A de Hart. Ou peut-être l'accroissement de la population n'est pas, comme l'ont supposé de nombreux chercheurs, une motivation forte pour voyager vers d'autres étoiles, en particulier pour une espèce qui développerait un mode de vie vraiment durable dans son système d'origine. Une révolution verte ultime éliminerait-elle toute tentation d'aller voyager ailleurs si ce n'est pour l'exploration scientifique ?

Certaines conceptions jouent sur une note plus sombre, comme la notion de «grand filtre», c'est-à-dire l'idée qu'il y a toujours quelque chose qui limite une espèce : une évolution qui conduit invariablement toute vie technologique à sa propre extinction (guerre, pollution, épuisement des ressources, etc.). Peut-être que des cataclysmes naturels, depuis les explosions de supernovæ jusqu'à des soubresauts énergétiques du trou noir central de la Voie lactée, éliminent régulièrement la vie dans la Galaxie et l'empêchent ainsi de se diffuser.

Il existe des propositions encore plus extrêmes, comme l'hypothèse du zoo. D'après ce scénario, nous sommes maintenus délibérément isolés par des puissances extraterrestres. Il y a également ce que j'aime appeler le scénario de la paranoïa : d'autres civilisations existent, mais elles se cachent et refusent de communiquer par peur de dévoiler leur position à une autre espèce potentiellement belliqueuse.

Mais peut-être existe-t-il des explications plus simples à notre ignorance actuelle

concernant les extraterrestres. Ces réponses pourraient partager des caractéristiques avec l'exemple que nous avons juste sous le nez : l'occupation humaine des îles du sud du Pacifique, variable dans le temps et dans l'espace. Tant dans le cas terrestre que dans le cas extraterrestre, des facteurs essentiels et universels sont en jeu, comme la rareté des endroits propices ou le temps dont a besoin une population pour se préparer à pousser un peu plus loin l'exploration de l'immensité.

En 2015, Adam Frank, de l'université de Rochester, et moi déjeunions près du campus de l'université Columbia, à New York. Comme lors du repas de Fermi soixante-cinq ans plus tôt, la conversation tournait autour de la nature des espèces qui explorent l'espace. Et, sans doute inspirés par le calcul mental de Fermi, nous avons essayé de concevoir une stratégie d'investigation qui ferait le moins possible d'hypothèses non corroborées et que l'on pourrait tester ou contraindre à l'aide de données réelles. Au cœur de cet exercice, il y avait l'idée simple que, comme avec l'occupation transitoire de l'île de Pitcairn, l'exploration ou la colonisation de la Galaxie se ferait par vagues, avec des flux et des reflux. Et que l'humanité

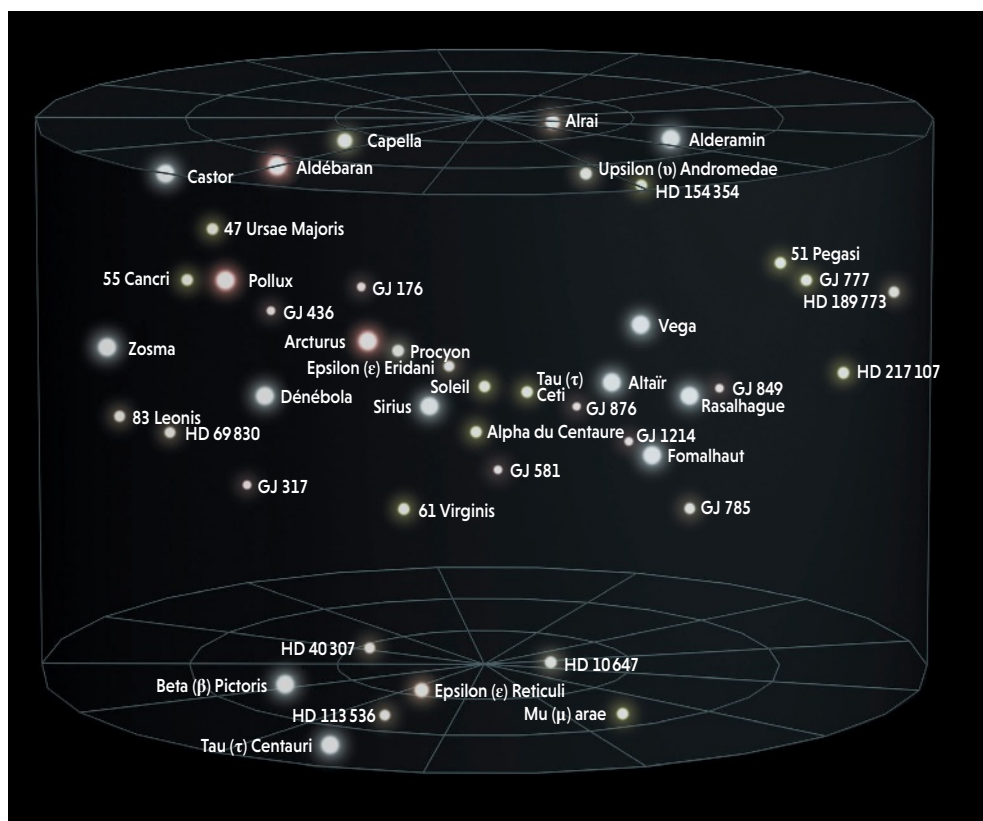


Beaucoup de solutions au paradoxe de Fermi ont été proposées



aurait émergé lors d'une période où notre région de la Voie lactée subissait un reflux.

Cette idée est en accord avec la constatation A de Michael Hart : il n'y a pas de preuve aujourd'hui sur Terre de la présence d'explorateurs extraterrestres. Mais elle offre la possibilité d'aller plus loin et d'estimer la durée pendant laquelle la Terre n'aurait pas connu de visites. Peut-être des extraterrestres sont-ils passés ici il y a très longtemps. Un certain nombre de scientifiques ont discuté, au fil des ans, la possibilité de chercher des artefacts dans le Système solaire que ces visiteurs auraient laissés derrière eux. Il est un peu difficile de prédire l'envergure que devrait avoir une recherche complète, mais une recherche sur Terre est davantage à notre portée. En 2018, Gavin Schmidt, de l'institut Goddard de science spatiale de la Nasa, et Adam Frank ont évalué nos capacités à déterminer si la Terre a



Carte tridimensionnelle du Soleil (au centre) et des étoiles les plus proches. Comme les astres se déplacent les uns par rapport aux autres, les distances varient au cours du temps.

connu une civilisation industrielle venue d'ailleurs.

Gavin Schmidt et Adam Frank ont d'abord constaté (comme la plupart des planétologues) que le simple passage du temps efface très facilement presque toute trace de vie technologique sur la Terre. Les seules preuves qui resteraient après un million d'années ou plus se réduiraient à des anomalies stratigraphiques isotopiques ou chimiques: présence de molécules de synthèse, de plastiques ou de déchets radioactifs à longue durée de vie. Les restes fossiles et autres marqueurs paléontologiques sont tellement rares et dépendent de conditions de formation si particulières qu'ils seraient inexploitablement.

PAS D'INDICES ARCHÉOLOGIQUES

Par ailleurs, les sites humains modernes ne couvrent qu'environ 1% de la surface de la planète. S'il en était de même pour les civilisations passées, les chances de découverte pour les paléontologues seraient limitées. Et personne n'est en mesure de réaliser des fouilles exhaustives sur Terre pour trouver des signatures non naturelles. Concrètement, cela signifie que si une civilisation industrielle à l'échelle de la nôtre a existé il y a quelques millions d'années, nous pourrions très bien ne pas le savoir. Cela ne veut absolument pas dire qu'il en a existé une; cela indique simplement qu'en toute rigueur, on ne peut pas exclure cette possibilité.

Ces dernières années, avec Jonathan Carroll-Nellenback, de l'université de Rochester, et Jason Wright, de l'université d'État de Pennsylvanie, nous nous sommes intéressés aux implications de ces idées (un peuplement par vagues, des traces du passé qui s'effacent), à l'échelle de la Galaxie. Pour ce faire, nous avons développé des simulations à base d'agents (où l'on étudie un comportement global à partir d'entités individuelles qui suivent des règles simples et évoluent de façon indépendante), complétée par les bonnes vieilles mathématiques à base de papier et crayon. Nous avons alors brossé un tableau plus réaliste de la façon dont des espèces se déplaceraient au sein d'une galaxie elle-même mouvante.

Si vous regardez les étoiles situées dans un rayon de quelques centaines d'années-lumière du Soleil, vous vous apercevrez qu'elles se déplacent comme les particules d'un gaz. Par rapport à n'importe quel point fixe de cette portion d'espace, une étoile peut se déplacer vite ou lentement, et ce dans une direction en pratique aléatoire. Si vous considérez des régions de quelques milliers d'années-lumière de diamètre, vous commencerez à observer un mouvement d'ensemble de rotation autour du centre de la Galaxie (qui amène, par exemple, le Soleil à faire le tour de la Voie lactée avec une période de 230 millions d'années environ). Les étoiles plus proches du centre galactique effectuent une révolution plus rapidement, et >

> certaines étoiles du « halo » en mouvement rapide plongent dans ou hors du plan du disque galactique, au sein d'un essaim plus ou moins sphérique entourant ce disque.

Dès lors, une civilisation qui cherche autour d'elle des étoiles à explorer constaterait que les astres les plus proches varient énormément avec le temps. Actuellement, Proxima du Centaure est l'étoile la plus proche du Soleil. Elle se trouve à 4,24 années-lumière de nous ; mais dans environ 10 000 ans, elle ne sera plus qu'à 3,5 années-lumière. Elle sera alors un peu plus facile à atteindre, avec un voyage interstellaire moins long. Et dans 37 000 ans, notre plus proche voisine sera la naine rouge Ross 248, à seulement 3 années-lumière.

Pour modéliser cette carte stellaire changeante, nous avons simulé une boîte tridimensionnelle d'étoiles, avec des mouvements proches de ceux observés dans une petite portion de la Voie lactée. La simulation enclenche alors un « front » de colonisation, en désignant une sélection de ces étoiles comme hôtes des civilisations qui explorent l'espace. Ces civilisations ont des durées de vie finies, de telle sorte qu'un système peut aussi devenir occupé. Une civilisation est aussi soumise à un délai d'attente avant d'être capable de lancer des missions d'exploration robotique ou des programmes de colonisation vers sa plus proche étoile. Tous ces facteurs peuvent être modifiés, ajustés et explorés afin de voir comment ils influent sur le résultat. Dans une vaste majorité de cas, on constate la propagation d'un front de colonisation assez disparate à travers l'espace interstellaire. La vitesse de cette propagation est le paramètre clé pour recouper et confirmer les solutions possibles de l'énigme initiale de Fermi.

Ce que nous observons est à la fois simple et subtil. Tout d'abord, le mouvement naturel des étoiles dans la Galaxie, semblable à celui d'un gaz, signifie que même les vaisseaux interstellaires les plus lents, se déplaçant à quelque 30 kilomètres par seconde (soit près du double de la vitesse actuelle de la sonde *Voyager 1* qui est en train de quitter le Système solaire, à 17 kilomètres par seconde) garantiraient qu'un front de colonisation traverserait la Galaxie en bien moins d'un milliard d'années.

Si l'on prend en compte les mouvements stellaires, comme la rotation galactique ou les étoiles du halo, cette durée diminue. En d'autres termes, comme Fermi l'avait compris, il n'est pas difficile de remplir la Galaxie de vie. Mais le « niveau de remplissage » de la Galaxie dépend à la fois du nombre de planètes véritablement colonisables (ce que nous avons désigné sous le nom d'« effet Aurora », en hommage au roman de science-fiction *Aurora* de Kim Stanley Robinson, paru en 2015, qui met en lumière les difficultés de la colonisation

spatiale) et de la durée de vie d'une civilisation sur une planète donnée.

Il est facile de rendre la Galaxie vide de vie en réduisant simplement le nombre de planètes adéquates ou en décrétant que les civilisations ne durent qu'une centaine de milliers

Certains endroits de la Galaxie sont trop isolés pour valoir la peine de les explorer

BIBLIOGRAPHIE

J. Carroll-Nellenback et al., **The Fermi paradox and the Aurora effect : Exo-civilization settlement, expansion, and steady states**, *Astronomical Journal*, vol. 158(3), art. 117, 2019.

M. M. Ćirković, **The great silence : Science and philosophy of Fermi's paradox**, Oxford University Press, 2018.

M. Livio, Winston Churchill et la vie extraterrestre, *Pour la Science*, n° 474, avril 2017.

M. Agelou et al., **Où sont-ils ?**, CNRS Éditions, 2017.

G. Landis, **The Fermi paradox : an approach based on percolation theory**, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 51, pp. 163-166, 1998.

B. R. Finney et E. M. Jones (éd.), **Interstellar migration and the human experience**, University of California Press, 1985.

d'années. À l'autre extrême, il est facile de modifier ces facteurs pour remplir l'espace de colonies actives. En fait, si les mondes habitables sont assez nombreux, la durée de vie moyenne des civilisations implantées n'a presque aucune importance. Si elles restent maîtresses de la technologie qui leur a permis de prendre le départ, alors il en restera toujours assez pour poursuivre l'exploration et, à terme, remplir la Galaxie.

UNE COLONISATION PAR VAGUES

Mais c'est entre ces deux extrêmes que l'on trouve les situations les plus réalistes et les plus convaincantes. Quand la fréquence des mondes colonisables n'est ni très élevée ni très basse, des choses étonnantes peuvent se produire. En particulier, les effets des fluctuations statistiques sur le nombre et la localisation des mondes habitables dans les différentes régions de la simulation créent des regroupements de systèmes stellaires où les explorateurs interstellaires s'établissent régulièrement au cours de vagues successives. On peut se représenter ces régions spatiales comme des archipels ou des chapelets d'îles. L'existence de ces amas a une contrepartie : typiquement, ils sont entourés de vastes zones non colonisées, des endroits trop lointains et trop clairsemés pour valoir la peine de les explorer.

Ce scénario d'« archipel galactique » peut-il expliquer la situation de la Terre ? C'est possible. Par exemple, si les civilisations planétaires typiques peuvent durer un million d'années et que seuls 3 % des systèmes stellaires sont véritablement colonisables, on a une probabilité d'environ 10 % qu'une planète telle

que la Terre n'ait pas été visitée depuis au moins un million d'années. En d'autres termes, il n'est pas improbable que nous nous trouvions du côté solitaire de l'équation.

À l'inverse, ce scénario implique qu'ailleurs dans la Galaxie, il existe des amas, des archipels d'espèces interstellaires pour lesquelles la norme est d'avoir régulièrement des voisins ou des visiteurs cosmiques. De notre point de vue, les hypothèses adoptées pour obtenir ce résultat nous semblent raisonnables: il suffit d'un décompte des planètes habitables (ce que les spécialistes des exoplanètes étudient actuellement) et de prendre en compte les mouvements des étoiles dans la Voie lactée. Certes, il est nécessaire de faire des hypothèses sur la faisabilité du voyage interstellaire et la probabilité qu'une espèce l'entreprenne. La longévité des civilisations est une inconnue, mais une question très étudiée surtout à l'heure où nous, Terriens, tentons de régler nos propres problèmes de durabilité planétaire.

Il y a aussi la possibilité que nous découvririons des preuves de l'existence d'archipels stellaires colonisés. Une nouvelle stratégie intéressante consisterait à cibler nos recherches

d'intelligence et de technologie extraterrestre non pas sur des exoplanètes individuelles connues, mais plutôt sur des régions galactiques dont la topographie stellaire se prêterait à l'expansion stellaire ou aux amas. Jusqu'à récemment, notre carte tridimensionnelle de l'espace galactique était très limitée, mais avec des instruments tels que l'observatoire spatial *Gaia*, qui cartographie un milliard d'objets astronomiques et de mouvements stellaires, nous pourrions être en mesure de cartographier de façon plus réaliste ces «points chauds».

En fin de compte, le paradoxe de Fermi pourrait avoir une explication assez simple. Un monde habitable et habité tel que la Terre peut très bien rester longtemps sans aucune visite (de la même façon que Pitcairn a été inoccupée pendant trois siècles), même si la Galaxie regorge de formes de vie technologiquement avancée et d'explorateurs interstellaires. La Terre pourrait simplement connaître une période transitoire d'isolement avant d'être balayée à nouveau par une vague cosmique de vie pangalactique. La vraie question est de savoir si la civilisation humaine sera toujours là quand cela se produira. ■



**MUSÉUM
NAT HIST
NATURELLE**

**pour
que
nature
vive**

LA SÉRIE AUDIO
POUR COMPRENDRE
LE VIVANT ET
NOTRE PLANÈTE

SCIENCE

Biodiversité, le saut dans l'inconnu
avec Bruno David, paléontologue et biologiste,
président du Muséum national d'Histoire naturelle

Une planète, une santé
avec Coralie Martin, chercheuse en parasitologie
à l'INSERM et au Muséum

Cuisiner la nature
avec Christophe Lavelle, chercheur en science
de l'alimentation au CNRS et au Muséum

Sommes-nous trop nombreux sur terre ?
avec Gilles Pison, démographe, professeur
au Muséum

**Être(s) vivant(s) depuis 3 milliards
et demi d'années**
avec Sylvie Crasquin, paléontologue, directrice
de recherche au CNRS et au Muséum

Le Printemps silencieux aura-t-il lieu ?
avec Grégoire Loïs, écologue à l'Office français
de la biodiversité et au Muséum

À écouter sur
les plateformes de podcasts
et sur <https://bit.ly/Museum-PQNV>

  **BIODIVERSITÉ,
TOUS VIVANTS !**

L'ESSENTIEL

> Il a longtemps été difficile de déterminer comment les mains des animaux à quatre membres ont évolué à partir des nageoires de leurs ancêtres poissons, du fait de la rareté des fossiles documentant la transition.

> La récente découverte d'un squelette complet d'un poisson

vieux de 375 millions d'années bouleverse les connaissances sur l'origine des mains et l'émergence des tétrapodes.

> Les doigts seraient apparus avant la sortie des eaux, chez des poissons osseux capables d'inspirer de l'air hors de l'eau.

LES AUTEURS



JOHN A. LONG
professeur de paléontologie
à l'université Flinders,
à Adélaïde, en Australie
méridionale



RICHARD CLOUTIER
professeur de biologie
évolutive à l'université
du Québec à Rimouski

Quand les poissons avaient des doigts

Un fossile remarquable révèle que les doigts sont apparus avant que les vertébrés ne quittent l'eau et ne colonisent la terre ferme.

