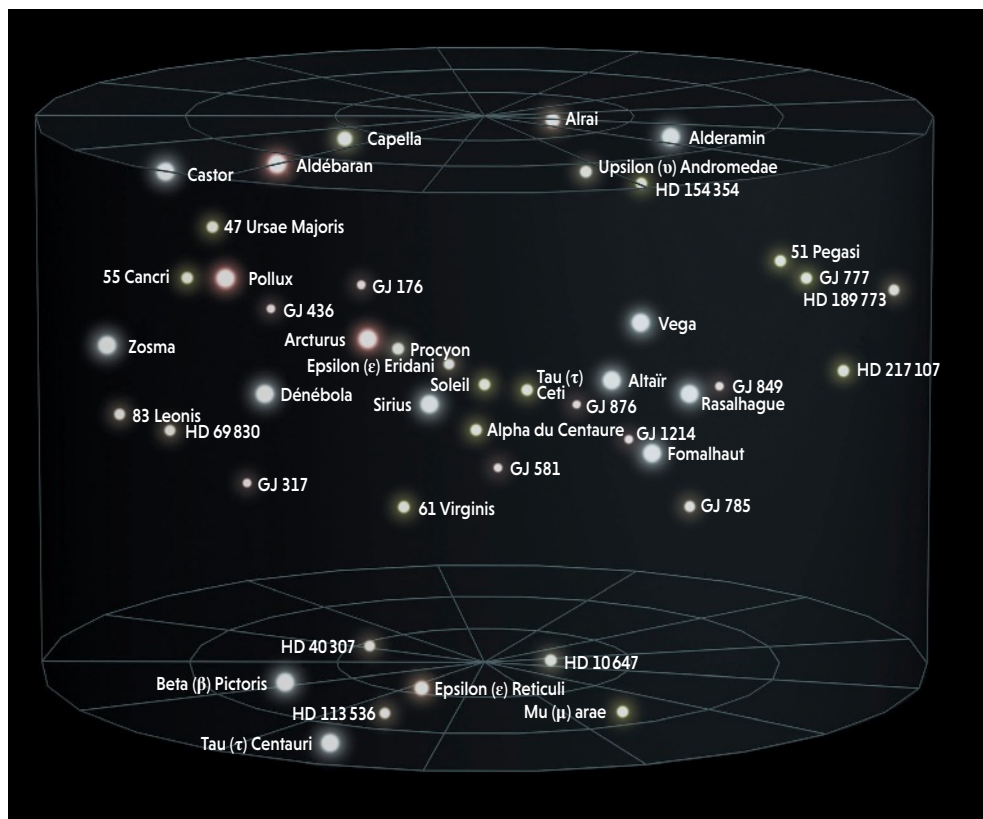




Carte tridimensionnelle du Soleil (au centre) et des étoiles les plus proches. Comme les astres se déplacent les uns par rapport aux autres, les distances varient au cours du temps.

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 inoccupé. 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 à 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. ■



**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>

