

> 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.

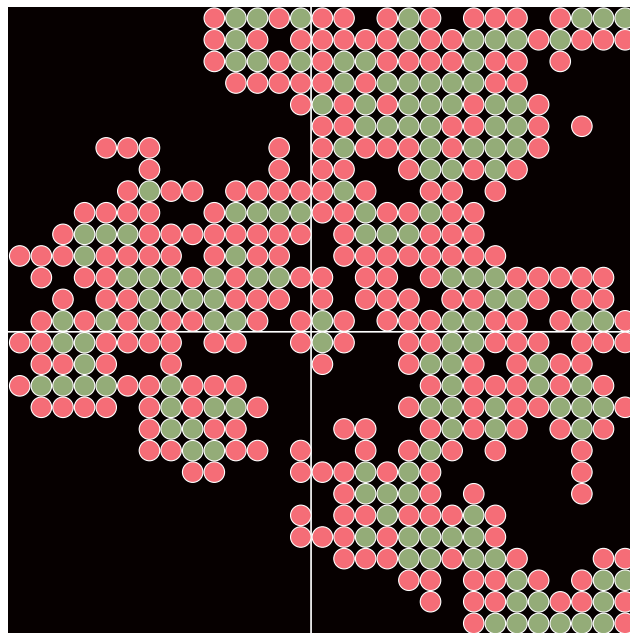
Il existe diverses façons de modéliser le processus de migration galactique. Un exemple classique s'inspire du phénomène physique de percolation, qui désigne l'écoulement d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable, à l'image de la préparation du café où l'eau traverse le café moulu. La modélisation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

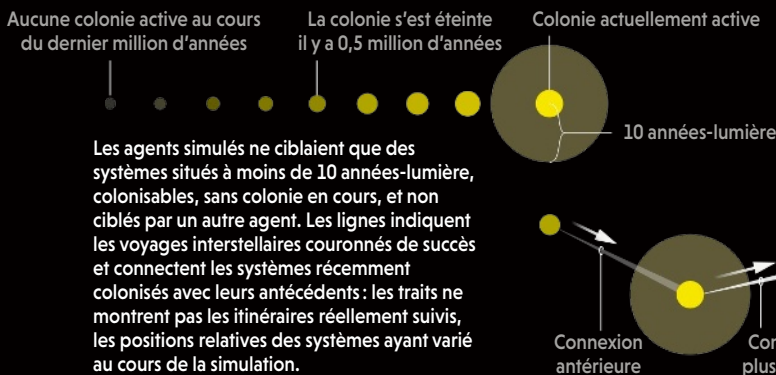
Cet instantané d'une simulation représente 10 millions d'années d'exploration interstellaire pour 10 000 systèmes colonisables dans un cube d'environ 464 années-lumière de côté. Les systèmes non colonisables sont 22 fois plus nombreux que les systèmes propices, mais ils ne sont pas représentés ici. À 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.

