

Vincent Boqueho

La Vie, ailleurs ?

Préface d'André Brack



DUNOD

Facebook : *La culture ne s'hérite pas elle se conquiert*

Copyright Dunod, 2011

9782100565634

Visitez notre site Web : www.dunod.com

Consultez le [site Web de cet ouvrage](#)

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, sous réserve du nom de l'auteur et de la source, que « les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information », toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite (art. L122-4). Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, notamment par téléchargement ou sortie imprimante, constituera donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

« N'oublions jamais que le droit au rêve ne prend toute sa valeur
qu'accompagné du droit à la lucidité ».
Georges Charpak.

Préface

L'existence de mondes habités au-delà de la Terre a nourri l'imaginaire humain depuis l'Antiquité. Épicure, 300 ans avant notre ère, écrivait déjà à Hérodoté : « Les mondes sont en nombre infini. [...] On ne saurait démontrer que dans tel monde des germes tels que d'eux se forment les animaux, les plantes et tout le reste de ce qu'on voit, pourraient n'être pas contenus ». Un siècle avant Jésus-Christ, Lucrèce mentionne dans *De natura rerum* la possible existence d'extraterrestres : « Si la même force, la même nature subsistent pour pouvoir rassembler en tous lieux ces éléments dans le même ordre qu'ils ont été rassemblés sur notre monde, il te faut avouer qu'il y a dans d'autres régions de l'espace d'autres terres que la nôtre, et des races d'hommes différentes, et d'autres espèces sauvages. ». Dans *Le Banquet des Cendres*, Giordano Bruno (1548–1600) fait également mention de la possibilité d'habitants d'autres mondes : « ... ces mondes sont autant d'animaux dotés d'intelligence ; qu'ils abritent une foule innombrable d'individus simples et composés, dotés d'une vie végétative ou d'entendement, tout comme ceux que nous voyons vivre et se développer sur le dos de notre propre monde ». Bernard Le Bovier de Fontenelle publia en 1686 ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, tandis que le physicien et astronome hollandais Christiaan Huygens publiait le *Kosmotheoros* en 1698. Emmanuel Kant fut également un fervent défenseur de l'existence d'une vie au-delà de la Terre. Et au XX^e siècle, cette idée n'a cessé d'alimenter une vaste littérature de science-fiction.

Aujourd'hui, les remarquables progrès réalisés dans la connaissance du vivant terrestre, le perfectionnement des

instruments d'observation mis à la disposition des astronomes et les missions d'exploration du système solaire permettent d'aborder la recherche de vie extraterrestre de manière rationnelle. C'est cette approche passionnante que Vincent Boqueho décrit tout au long de son livre. Quelle forme de vie rechercher ? Où faut-il la rechercher ? Deux questions que l'auteur aborde de manière claire et pédagogique, avec de petites touches philosophiques bienvenues. Astrophysicien de formation, l'auteur était particulièrement compétent pour décrire les environnements habitables au-delà de notre système solaire. En une quinzaine d'années, près de 500 planètes extrasolaires ont été découvertes. La plupart sont des géantes gazeuses impropres à la vie, toutefois, une est située dans la zone habitable de l'étoile avec une masse estimée à environ trois ou quatre fois celle de la Terre, de sorte qu'elle pourrait être constituée essentiellement de roches, comme notre planète. De ce fait, elle pourrait présenter une température modérée à sa surface, compatible avec la présence d'eau liquide, et donc peut-être de vie. Les propriétés, températures et masses, des exoplanètes découvertes dans les 15 dernières années, permettent de penser que notre galaxie est peuplée d'innombrables planètes semblables à la Terre.

Sénèque écrivait déjà : « Les plus belles découvertes cesseraient de me plaire si je devais les garder pour moi. » Le message a parfaitement été entendu par Vincent Boqueho. Au-delà de la somme des connaissances transmises, le livre prépare le lecteur à la découverte de la première vie extraterrestre, événement majeur que beaucoup souhaitent vivre dans un avenir aussi proche que possible.

André Brack, exobiologiste

À ma mère.

Introduction

Sommes-nous seuls dans la Voie Lactée ? Voilà une question particulièrement angoissante...

Si la réponse est « Oui ! », alors l'Humanité est face à une terrible responsabilité : qu'elle détruise la vie terrestre, et tout espoir de développement de l'intelligence dans notre galaxie sera perdu ! À l'ère où l'Humanité forme une seule civilisation à l'échelle planétaire, et où elle a la capacité de s'autodétruire intégralement, une telle perspective fait froid dans le dos...

Si la réponse est « Non ! », alors d'autres questions se posent aussitôt : pourquoi les extraterrestres ont-ils délaissé la Terre jusqu'à aujourd'hui ? Où se cachent-ils ? Quelles sont leurs intentions à notre égard ? Nous laisseront-ils coloniser d'autres étoiles à l'avenir ? Leur présence est-elle un atout ou un handicap pour le développement futur de l'Humanité ?

Tout le monde s'est déjà posé ce type de questions, et la science-fiction s'est chargée de proposer des visions très diverses de « l'Univers habité », actuel et futur. Mais pendant ce temps, les progrès scientifiques se poursuivent, et ne cessent d'éclairer ces questions d'un nouveau jour. Qu'il s'agisse de la découverte de planètes autour d'autres étoiles, de la recherche de signaux artificiels émis quelque part dans la galaxie, ou de la recherche de vie sur Mars, chaque année apporte son lot de nouvelles informations.

Aussi, la question de notre solitude réelle ou hypothétique reste-t-elle d'autant plus captivante que les arguments en faveur ou en défaveur de l'existence d'extraterrestres se sont fortement enrichis

durant les dernières décennies. Ce sont ces arguments, anciens et nouveaux, que cet ouvrage entend présenter afin que chacun puisse former sa propre opinion.

À notre connaissance, l'Homme est le seul à posséder une intelligence développée ayant conduit à une civilisation technologique. Il est donc naturel de commencer par se demander ce qui a permis le développement de la vie sur Terre. Quelles sont les caractéristiques fortes de la vie terrestre expliquant qu'elle ait pu évoluer vers une intelligence de plus en plus grande ? Quels sont les processus physiques et chimiques fondamentaux à la base de ce développement ? Tel est l'objet du chapitre 1.

Ces questions en amènent d'autres dans leur sillage : les conditions nécessaires au développement de l'intelligence sont-elles très restrictives, ou au contraire assez souples ? Peut-on envisager une intelligence extraterrestre très différente de celle que nous connaissons ? Les réponses à ces questions nous éclaireront sur l'existence éventuelle d'extraterrestres au sein de notre galaxie. C'est l'objet du chapitre 2.

Le chapitre 3 marque une pause dans ces réflexions, en présentant plusieurs environnements dans notre galaxie radicalement différents de la Terre, et en proposant des formes de vie associées particulièrement originales... Il se base pour cela sur des systèmes planétaires réels découverts autour d'autres étoiles ces dernières années. C'est l'occasion de rêver un peu tout en gardant les pieds sur Terre !

Le chapitre 4 est assurément le point d'orgue de ce livre, car il met en avant ce qu'on appelle le « paradoxe de Fermi » et ses conséquences troublantes. En un mot, deux arguments antagonistes s'opposent : d'une part les centaines de milliards d'étoiles peuplant notre galaxie, souvent associées à des systèmes planétaires, plaident en faveur de l'existence d'une vie intelligente ailleurs que sur Terre. D'autre part, le fait est qu'aucune civilisation

extraterrestre ne s'est installée sur Terre au cours de sa longue histoire, et qu'aucun indice de la présence d'extraterrestres dans la Galaxie n'a pu être observé jusqu'à présent. Le chapitre 4 précise les arguments derrière ce paradoxe, et propose des pistes pour le résoudre.

Le besoin de satisfaire le paradoxe de Fermi réduit notablement les scénarios envisageables en ce qui concerne le peuplement de notre galaxie. Le chapitre 5 est une ouverture qui met résolument le pied dans la science-fiction, présentant plusieurs visions possibles du peuplement de l'Univers, actuel et futur. Les scénarios proposés vont d'une galaxie grouillante de vie extraterrestre à une totale solitude de l'Humanité, seule en charge de coloniser les autres systèmes planétaires...

Notre place dans l'Univers est un puissant mystère ; mais ce qui le rend plus captivant encore, c'est que nous sommes en mesure de le résoudre, et que notre travail de détective a connu des avancées bouleversantes au cours de la dernière décennie. Ce livre présente plus que du rêve : il explique ce que l'Homme est susceptible de découvrir lorsqu'il s'éveillera...

Qu'est-ce que la vie ?

« Bien lire l'Univers, c'est bien lire la Vie. »

Victor Hugo

Avant de chercher à savoir si la vie existe sur d'autres planètes, il faut déjà se demander ce qu'est la vie sur Terre. Il n'en existe pas de définition bien arrêtée, mais en général, on définit un être vivant comme « un système matériel capable de se dupliquer presque à l'identique ».

C'est donc avant tout la « capacité de reproduction » qui définit la vie, et c'est effectivement une propriété forte qui explique sa stabilité. En quelque sorte, une telle structure matérielle crée des « sauvegardes » d'elle-même : lorsque la structure originelle est détruite, l'information qu'elle contient n'est pas perdue, puisqu'elle a été transmise à ses répliques...

Toutefois, les répliques ne sont jamais parfaitement identiques à l'original. On peut distinguer deux raisons à cela :

- Dans le cas de la reproduction sexuée, l'organisme fils reçoit de l'information provenant de deux organismes différents (les parents). Il se distingue donc à la fois du père et de la mère et possède une information spécifique et une identité propre.
- Par ailleurs, des mutations largement aléatoires peuvent survenir et modifier l'information initiale, même dans le cas d'une reproduction asexuée.

Dans tous les cas, le fait que l'information contenue dans les êtres vivants n'est pas figée est une grande force pour la vie : cela lui

permet de s'adapter à l'évolution à long terme de l'environnement, par le biais de la sélection naturelle. En d'autres termes, la capacité de se dupliquer est un atout énorme, à condition qu'elle ne soit pas parfaite...

Définition **Être vivant** : Système matériel capable de se répliquer presque à l'identique. Il est notamment caractérisé par une structure complexe et ordonnée.

Outre par sa capacité de reproduction, la vie est également caractérisée par une propriété forte qui nous intéressera beaucoup dans la suite : les êtres vivants sont des systèmes complexes et très structurés. Même une simple bactérie, qui n'est pourtant qu'une cellule sans noyau, possède une structure et une complexité qui dépassent largement celle de toute matière inerte. Sa seule membrane est constituée de molécules gigantesques formées d'un agencement à la fois complexe et extraordinairement ordonné d'atomes. Cette structuration exceptionnelle des êtres vivants est indispensable pour assurer leurs propriétés de réplication : un agencement aléatoire d'atomes est en effet dépourvu de toute fonctionnalité, et n'est donc que simple « poussière ».

Peut-on envisager des systèmes complexes et structurés qui ne soient pas du vivant, c'est-à-dire qui ne se répliquent pas ? De telles structures ne créeraient pas de « sauvegardes » d'elles-mêmes : le seul moyen pour les remplacer serait d'en reformer à partir de l'environnement, en « repartant de zéro ». Cela prendrait un temps considérable : ainsi, il a fallu pas moins de cinq cents millions d'années pour passer du poisson à l'Homme...

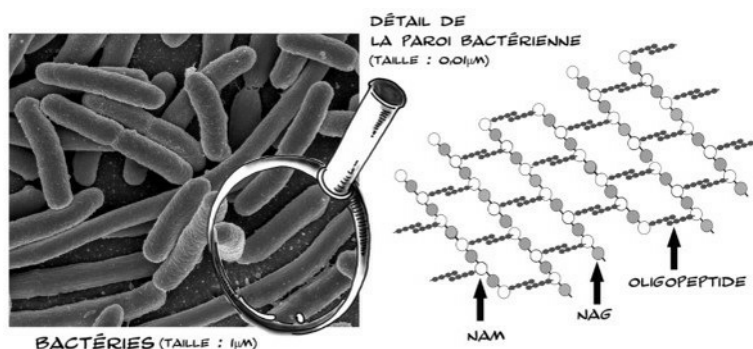
En d'autres termes, pour créer en un temps raisonnable un système complexe et ordonné, il faut nécessairement un autre système complexe et ordonné : la capacité de réplication paraît indispensable pour maintenir en l'état une telle structure.

Finalement, la capacité de réplication est à la fois une cause et une conséquence de la structure complexe et ordonnée des êtres vivants : les deux semblent aller de pair.

La bactérie, une structure complexe

La bactérie, en tant que cellule sans noyau, est l'un des êtres vivants les plus simples existant sur Terre. Pourtant, la structuration moléculaire d'une bactérie est extrêmement complexe : la figure ci-dessous montre l'exemple de la paroi bactérienne.

Notons que la matière inerte peut être très structurée elle aussi : c'est le cas des cristaux comme le diamant. Mais cette structure n'est constituée que par des atomes ou des molécules assez simples : ainsi, le diamant est un simple réseau d'atomes de carbone. La vie est la seule à créer des agencements à la fois ordonnés et complexes.



Sur le zoom de droite, chaque cercle représente lui-même une molécule organique complexe.

La vie à toutes les échelles

La vie regroupe des structures à l'échelle microscopique (les bactéries) et à l'échelle macroscopique (la faune et la flore à notre échelle). Cette cascade d'échelles implique qu'un être vivant peut être formé d'êtres vivants plus petits. Par exemple, le corps humain est constitué de cellules capables de se dupliquer : ainsi l'Homme dans son ensemble est un être vivant (puisque'il peut se reproduire), mais il est lui-même constitué de structures vivantes microscopiques (les cellules).

Cela nous invite à imaginer des êtres vivants qui se « superposeraient » sur trois échelles différentes. Prenons l'exemple d'une colonie de fourmis : la fourmi est un être vivant (elle peut se reproduire), formée de cellules comme le corps humain. Mais elle est elle-même une composante infime d'une structure complexe et organisée à beaucoup plus grande échelle : la colonie. Une colonie est constituée de tout un ensemble de fourmis étroitement interdépendantes avec chacune un rôle distinct permettant à la colonie dans son ensemble de fonctionner : celle-ci acquiert ainsi une organisation propre qui n'apparaissait pas à l'échelle inférieure. De plus, la colonie peut se dupliquer, par l'intermédiaire d'une reine capable de reformer un nouveau « réseau de fourmis » à un autre endroit, ayant un fonctionnement d'ensemble identique. Autrement dit, la colonie en tant « qu'ensemble de fourmis interdépendantes » s'apparente à un être vivant, de même que le corps humain en tant « qu'ensemble de cellules interdépendantes ».

Dans une colonie de fourmis, la somme des comportements individuels de chaque fourmi crée un comportement global distinct, et c'est ce qui permet de faire émerger une nouvelle structure à plus grande échelle : on parle « d'intelligence collective » (ou de « synergie »). De même dans le corps humain, la structuration à grande échelle est permise grâce à « l'intelligence collective » issue du comportement individuel de chaque cellule.

Il faut toutefois préciser qu'il existe un saut quantitatif important entre la colonie de fourmis et le corps humain, en ce qui concerne la complexité de la structure : l'agencement et le fonctionnement des cellules dans le corps humain sont infiniment plus complexes que celui des fourmis dans une fourmilière ! Ainsi, une colonie peut accueillir plusieurs centaines de milliers de fourmis, tandis que le corps humain contient plus de cent mille milliards de cellules...

L'exemple de la fourmilière permet finalement de mettre en avant deux constats : tout d'abord, l'identification d'un organisme vivant peut être moins évidente qu'elle ne le semble de prime abord, même sur Terre. Autant dire qu'elle pourrait être encore plus délicate concernant des formes de vie extraterrestre présentes sur d'autres planètes !

D'autre part, la limite entre le vivant et l'inerte apparaît comme assez floue. Ainsi les êtres vivants ont la propriété de se dupliquer « presque à l'identique » : jusqu'à quel point la réplique doit-elle être fidèle à l'original pour que l'organisme puisse être considéré comme vivant ? Par ailleurs, les organismes vivants sont des systèmes « très complexes et très structurés » : à quel niveau minimal de complexité commence le règne du vivant ? Selon les critères adoptés, la colonie de fourmis pourra être vue ou non comme un organisme vivant...

Définition **Synergie** : phénomène dans lequel une communauté d'individus crée un effet plus grand que la somme de ces individus pris isolément. Elle est notamment à la base de l'intelligence collective.

Gaïa, un organisme planétaire ?

Passons à présent à une échelle encore plus grande : intéressons-nous à la biosphère prise dans son ensemble, à l'échelle planétaire. Tous les êtres vivants sont en interdépendance dans cette biosphère : les herbivores mangent les végétaux, les carnivores mangent les herbivores, les bactéries décomposent les animaux et les végétaux morts, et les végétaux récupèrent la matière organique... Il s'agit d'une structure gigantesque à l'organisation complexe, qui, prise comme un tout, a un fonctionnement propre. L'Homme en est un maillon, de même que la fourmi est un maillon dans la colonie, de même que la cellule est un maillon

dans le corps humain.

Appelons donc « Gaïa » cet « organisme » planétaire : est-ce un être vivant ? Il forme bel et bien une structure complexe et organisée, mais est-il capable de se reproduire ? Il lui faudrait pour cela une deuxième planète où se dupliquer !

Aussi saugrenue que cette idée de « reproduction interstellaire » puisse paraître, elle ne peut pas être totalement rejetée aujourd'hui : il n'est pas exclu que certaines cellules terrestres puissent être éjectées dans l'Espace, et conservées à l'abri des rayons cosmiques nocifs dans une gangue de matière. Certaines d'entre elles pourraient alors atteindre une autre planète orbitant autour d'une autre étoile, dont l'environnement serait favorable à leur développement. Les cellules pourraient alors reformer une nouvelle biosphère sur cette nouvelle planète, similaire à celle terrestre (puisque basée sur un même type de constituant microscopique), sans pour autant lui être identique en tout point. Ainsi, Gaïa serait capable de se dupliquer, tout en mutant afin de s'adapter au nouvel environnement. Dans ce cas, Gaïa posséderait bien les caractéristiques d'un être vivant.

Une telle théorie de diffusion de la vie de planète en planète s'appelle la « panspermie ». Il faut bien préciser qu'aucune observation n'a permis jusqu'à présent d'appuyer cette théorie, qui a surtout le mérite d'être assez « élégante »... En fait, le scénario que nous venons de présenter reste assez peu probable : nous y reviendrons dans la suite de ce livre.

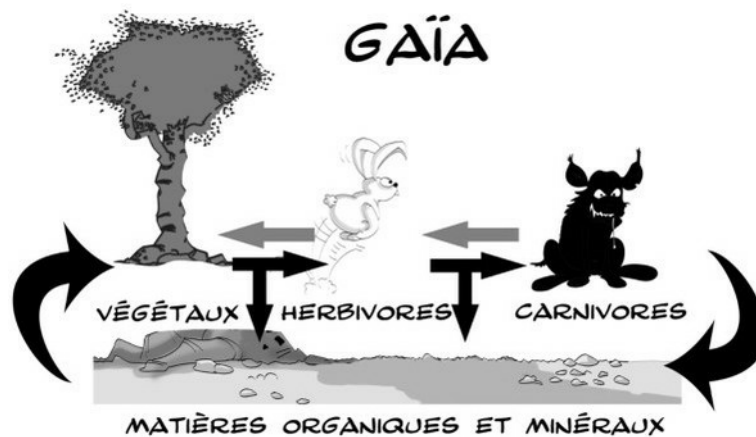
Quoi qu'il en soit, le fait que « Gaïa » puisse se dupliquer ou pas n'est pas essentiel pour ce qui nous occupe : cela ne change en rien la nature de la biosphère. Nous nous contenterons de constater qu'en tant que structure complexe et organisée, « Gaïa » s'apparente à un être vivant.

Le fonctionnement de la biosphère terrestre



Une cascade d'échelles

Chaque organisme d'une échelle supérieure est un réseau d'organismes de l'échelle inférieure. Des échelles intermédiaires peuvent éventuellement s'intercaler (comme dans l'exemple de la colonie de fourmis).



La chaîne alimentaire

Les flèches en gris rappellent que la dépendance est souvent à double sens. Par exemple, les abeilles utilisent la production des plantes à fleurs pour vivre, mais permettent en retour leur reproduction. Si le niveau de dépendance augmente globalement de la gauche vers la droite, tous les maillons de la chaîne n'en sont donc pas moins étroitement interdépendants.

Gaïa possède donc certaines caractéristiques propres au vivant, tout comme la colonie de fourmis. Les mots doivent toutefois être utilisés avec prudence, car ils peuvent convoier des notions sans aucun lien avec la définition de la vie. Ainsi, parler de Gaïa comme d'un être vivant peut éveiller l'idée d'un être doté de « conscience ». Toute modification locale de l'environnement

naturel est alors perçue comme une action faisant « souffrir la planète ». Cela tend à prêter des caractéristiques humaines à Gaïa, qui n'est somme toute qu'un simple système matériel de grande envergure... De même, considérer une colonie de fourmis comme un unique être vivant ne doit pas nous mener pour autant à croire que ce « système » posséderait une conscience, qui serait « supérieure » à celle d'une simple fourmi...

En revanche, le fait d'appeler « Gaïa » la biosphère terrestre prise dans son ensemble permet de mieux prendre conscience de sa fragilité et de son importance en tant que système global. L'atteinte massive de l'Homme à l'environnement naturel peut avoir des conséquences graves et irréversibles sur la planète, puisque tous les constituants de la biosphère sont en interaction. On peut prendre l'image de certaines cellules du corps humain qui se mettraient à proliférer, à la manière d'un cancer : à court terme ces cellules deviendraient plus nombreuses et plus fortes, mais à long terme elles mèneraient à la mort du corps. À cet instant, non seulement les cellules ne pourraient plus se développer, mais elles mourraient tout simplement, puisque aucun corps ne serait plus là pour les alimenter.

Il s'agit donc de ne pas reproduire ce scénario dans ce système complexe qu'est la biosphère planétaire : la prudence est de mise dans une telle structure très ordonnée car, en raison de cet ordonnancement méticuleux, une action minime peut entraîner des conséquences majeures et inattendues.

La vie et la conscience

Si la vie est tellement associée à la conscience dans notre esprit, c'est évidemment parce que nous mettons l'Homme « au sommet de la pyramide » : la vie nous semble fascinante parce qu'elle a permis à des êtres doués de conscience d'émerger.

Il est très difficile de savoir quelle structure matérielle bien particulière peut permettre l'apparition de la conscience. Il est même impossible de déterminer les organismes doués de conscience : dans l'absolu, seule l'existence de notre conscience personnelle est une certitude ! L'existence d'une conscience chez les autres n'est qu'une supposition « raisonnable », une simple analogie : « ces êtres me ressemblent, dans leur apparence et dans leurs comportements. Or je possède une conscience, donc ils doivent probablement en avoir une eux aussi »...

Plus l'apparence et le comportement d'un organisme s'éloignent du nôtre, plus nous sommes réticents à lui accorder une conscience. Le chimpanzé possède-t-il une conscience ? C'est possible. Le lézard en possède-t-il ? Cela nous semble peu probable. Une bactérie en possède-t-elle ? Cela nous paraît ridicule...

Ces conclusions intuitives ne sont basées que sur des analogies avec l'Homme, et il faut donc avoir conscience de leur fragilité : elles sont fondées sur un simple dogme. Par ailleurs, l'idée de l'existence ou non d'une conscience est sans aucun doute très réductrice : il est manifeste qu'il existe plusieurs niveaux de conscience. En effet, ces différents niveaux apparaissent chez l'Homme lui-même : le niveau de conscience lors d'un rêve n'est pas le même qu'à l'état de veille, et il peut même varier d'un rêve à l'autre. On peut de même imaginer un niveau de conscience qui s'échelonnerait progressivement au sein des différents êtres vivants que nous avons mentionnés : négligeable pour la bactérie, infime pour le lézard, relativement faible pour le chimpanzé, et élevé pour l'Homme éveillé. Là encore, il ne s'agit que de suppositions fondées sur des analogies et invérifiables.

Remarquons simplement que la conscience de l'Homme semble bel et bien naître dans le cerveau, ou au moins y trouver un support. Or le cerveau est peut-être l'exemple de structure

ordonnée la plus complexe qui soit : c'est cet enchevêtrement très ordonné des neurones qui permet de « compiler » des informations très diverses pour en « déduire » l'action à mener.

La conscience a-t-elle besoin de cette structuration « ultime » pour émerger ? C'est possible, mais rien ne permet de l'affirmer. Seule l'étude du cerveau jusqu'à des échelles de plus en plus microscopiques pourrait permettre d'en savoir plus, mais cela appartient à un avenir encore lointain. Peut-être constaterons-nous un jour qu'il est possible de créer de la conscience même dans des organismes artificiels, tels que des ordinateurs à la structure particulièrement aboutie (par exemple dans des « droïdes », pour reprendre un terme de science-fiction...).

Finalement, la recherche d'éventuels « êtres conscients » sur d'autres planètes est sans objet pour l'instant, puisqu'il nous est impossible de déterminer l'existence ou non d'une conscience, même chez nos semblables !

Le mystère de la conscience

Quels sont les processus en jeu quand vous souhaitez rattraper une balle ? Dans un premier temps, la lumière émise par la balle met en mouvement des charges au fond de votre œil : ce mouvement crée un signal électrique dans le nerf optique, qui se propage jusqu'à atteindre une zone située à l'arrière du cerveau. Là, le signal correspondant à l'image captée se propage sous forme électrique et chimique au sein d'un gigantesque réseau de neurones : vous venez de « voir » la balle.

Cette information électrochimique gagne ensuite la région médiane du cerveau : là elle se mélange à de très nombreux autres signaux, en provenance d'autres régions. Cette superposition d'informations diverses au sein d'un réseau très ordonné de neurones donne lieu à un « signal résultant », qui se propage vers l'avant du cerveau : vous venez de déterminer la conduite à suivre pour rattraper la balle.

Une fois qu'il atteint l'avant du cerveau, le signal électrochimique se retransforme en signal purement électrique qui commence sa propagation dans un nerf : vous venez de commander à votre bras de se lever. Ce signal électrique atteindra finalement le muscle de votre bras et provoquera

sa contraction.

Finalement, le processus dans le cerveau s'est schématiquement subdivisé en trois étapes : « perception, réflexion, action ». Mais ces trois étapes se sont succédé de façon totalement « mécanique » : le signal électrique issu du nerf optique s'est simplement combiné à d'autres signaux électrochimiques dans le cerveau, de façon particulièrement « judicieuse » grâce au réseau très ordonné de neurones, jusqu'à former un nouveau signal électrique transmis vers votre bras. La conscience ne semble avoir aucune place dans un tel processus !

Pourtant, au moment où le signal du nerf optique a atteint l'arrière de votre cerveau, vous avez bien « vu » la balle avec votre « esprit » (c'est-à-dire « spirituellement » et pas seulement « matériellement »). Pourquoi cette zone du cerveau est-elle la seule capable de transformer le signal matériel en un signal spirituel associé au sens de la vue ? Les neurones y semblent pourtant les mêmes qu'ailleurs : comme partout, il s'agit ni plus ni moins d'un réseau extrêmement complexe et ordonné d'atomes. Comment diable ce réseau-là peut-il donner naissance au sens de la vue ? Où s'effectue la transition du matériel au spirituel ? À l'échelle de l'atome, de la cellule, ou du réseau de neurones ? En quoi la conscience peut-elle être utile à la Nature, puisque a priori la structure matérielle du cerveau pourrait tout aussi bien s'en sortir sans elle ? Quel est l'intérêt de l'esprit, quelle est sa valeur ajoutée ?

La même question se pose bien sûr dans toutes les autres zones du cerveau, chacune ayant son propre lien bien distinct avec l'esprit. Par ailleurs dans certaines régions, les signaux semblent rester purement matériels sans créer de perception spirituelle : c'est le domaine de « l'inconscient ».

N'ayons pas peur des mots : le lien entre le corps et l'esprit est sans doute la plus grande énigme de la Nature. Il est à la racine des questions les plus existentielles de la philosophie : sans l'émergence de la conscience, personne ne serait là pour observer l'Univers et tout se passerait comme s'il n'existait pas. Se demander pourquoi on possède une conscience revient donc à se demander pourquoi il y a quelque chose plutôt que rien...

La vie et l'intelligence

Nous avons naturellement tendance à établir une « hiérarchie » dans le vivant : un simple « bouillon » de matière organique vivante a tout de même beaucoup moins d'intérêt qu'un animal

évolué tel que le chimpanzé ! De même, découvrir une « vie intelligente » sur une autre planète reste le but ultime, à défaut de pouvoir détecter une « vie consciente »...

Qu'est-ce au juste que l'intelligence ? Un Homme est intelligent non pas s'il connaît beaucoup de choses (il s'agit alors de simple mémoire), mais s'il est capable de compiler un grand nombre de données pour en tirer des conclusions nouvelles. La « capacité d'établir des liens entre plusieurs données pour en obtenir une nouvelle » est une caractéristique forte de l'intelligence.

L'intelligence n'est pas forcément liée à la conscience, et a le mérite d'appartenir au monde objectif et d'être « mesurable ». « L'intelligence artificielle » en fait partie : un « ordinateur intelligent » est capable de prendre en compte un nombre considérable de données très diverses pour en déduire la « conduite à suivre ».

La force de l'intelligence est qu'elle est liée à la capacité d'innovation : de nouvelles données déduites des anciennes viennent s'y ajouter, ce qui permet d'en déduire des conclusions supplémentaires, et ainsi de suite... La capacité d'innovation est alors limitée par l'intelligence elle-même : plus le nombre d'informations augmente, plus il devient difficile de les compiler pour en déduire de nouvelles. Plus un être est intelligent, plus il sera capable d'établir des liens entre de très nombreuses informations, et plus il pourra innover.

Notons à ce sujet qu'une société peut avoir une intelligence plus élevée qu'un individu isolé (comme dans le cas de la colonie de fourmis) : aucun individu ne peut tout connaître, chacun a donc un ensemble limité de données à sa disposition. Mais les petites informations que l'individu isolé est susceptible de découvrir peuvent ensuite être utilisées par un autre, qui possède d'autres données, et qui pourra donc émettre de nouvelles conclusions. Ainsi un groupe a-t-il une capacité d'innovation supérieure à celle

d'un individu : il est capable de compiler de proche en proche un grand nombre d'informations réparties entre ses membres, ce qu'un seul individu serait incapable de faire.

Définition

Intelligence : capacité à établir des liens entre un grand nombre de données pour en déduire une donnée nouvelle.

Il existe donc plusieurs niveaux d'intelligence, liés au nombre de données à partir desquelles des conclusions peuvent être établies. Ces différents niveaux d'intelligence semblent être directement liés au niveau de structuration de l'organisme.

En effet, il paraît clair qu'un assemblage aléatoire d'atomes est dépourvu de toute intelligence. Dans un ordinateur, chaque transistor a une place bien précise au sein d'une structure bien étudiée, et il y en a plusieurs milliards ! Quant au cerveau humain, il contient de l'ordre de cent milliards de neurones judicieusement agencés.

Nous sommes en train de parler de structures particulièrement complexes et ordonnées... Cela rejoint bien sûr l'une des propriétés fortes de la vie ! L'existence d'un organisme intelligent mais non vivant sur une autre planète paraît donc inenvisageable.

On peut toujours imaginer des systèmes intelligents mais qui ne se reproduisent pas, comme des super-ordinateurs. Mais cela signifie que d'autres êtres, intelligents et vivants, doivent être là pour les maintenir en état ou en recréer de nouveaux, puisque ces ordinateurs ne peuvent pas s'auto-répliquer. On retrouve l'idée centrale de la vie : un système organisé et complexe ne peut pas survivre à long terme si des répliques de lui-même ne sont pas créées régulièrement...

Il s'agit là d'un intérêt majeur de la vie : elle seule semble en mesure de conduire de façon autonome à des êtres intelligents.

Le réseau neuronal en quelques chiffres

Le cerveau humain contient environ cent milliards de neurones, soit vingt fois plus que celui du chimpanzé. Cependant, l'intelligence dépend surtout du nombre de connexions mises en jeu. Or chaque neurone humain peut créer des connexions avec environ vingt mille autres neurones, grâce à ses innombrables ramifications : cela offre au moins un million de milliards de connexions possibles dans le cerveau.

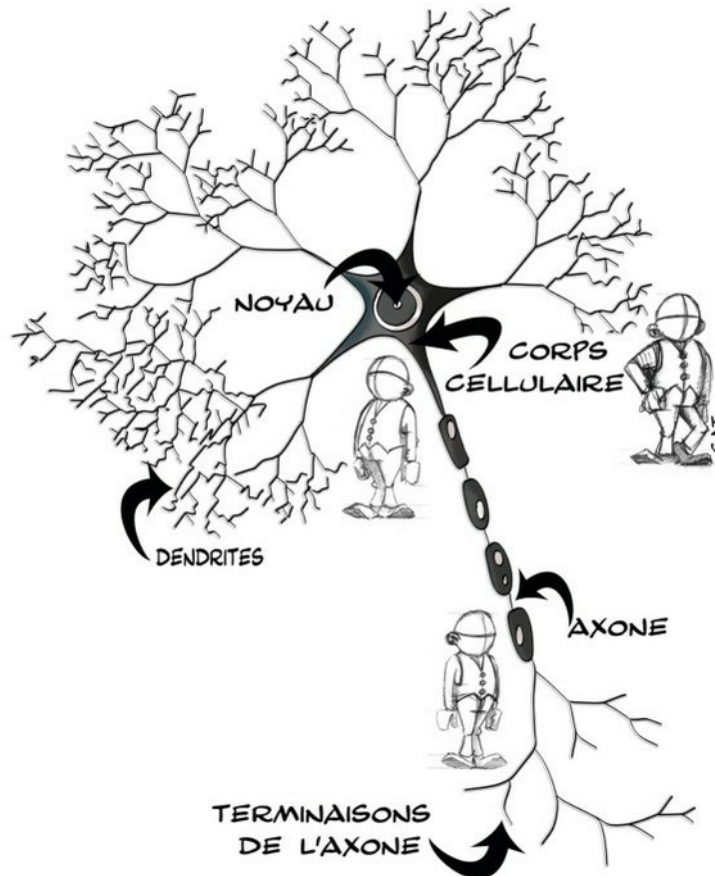


Schéma d'un neurone

D'autre part, pour qu'il y ait un développement possible de l'intelligence, ces connexions ne doivent pas s'établir au hasard. Le signal émis dans l'axone se renforce plus ou moins en fonction des signaux incidents captés au niveau des dendrites : c'est bien l'association de plusieurs données d'entrée qui conduit à un signal de sortie spécifique.

Chez les nouveau-nés, les connexions s'établissent encore largement au hasard : en effet, l'information contenue dans le génome humain reste bien trop faible pour pouvoir contenir « le code » de toutes les connexions à établir dans le cerveau. C'est donc par l'apprentissage, tout au long de la vie (et surtout pendant l'enfance), que le réseau de connexions se structure. Finalement, si le nombre de neurones dans le cerveau atteint un

maximum vers cinq ans, l'intelligence quant à elle peut s'accroître pendant toute la durée de la vie, puisqu'elle est due à une meilleure structuration du réseau de connexions...

Précisons enfin que le cerveau consomme environ un tiers de l'énergie totale utilisée par le corps humain. Mais en retour, le développement de l'intelligence a permis à l'Homme d'aller chercher plus efficacement sa nourriture : le bilan d'énergie est positif, justifiant que la Nature a autorisé la voie de l'intelligence dans l'évolution des espèces...

Les briques élémentaires de la vie

Définition **Atome** : brique essentielle de la matière constituée d'un noyau regroupant des protons et des neutrons, environné par un nuage d'électrons. On parle « d'élément » lorsqu'on ne s'intéresse qu'au nombre de protons. L'élément le plus léger est l'hydrogène (un seul proton), l'élément naturel le plus lourd présent sur Terre est l'uranium (92 protons).

Sur Terre, la vie est constituée de matière organique, c'est-à-dire de molécules à base de carbone, associé principalement à de l'hydrogène, de l'oxygène, et de l'azote.

Pourquoi a-t-elle choisi ces « briques » bien particulières pour se construire, alors qu'il existe près d'une centaine d'éléments différents dans l'Univers ? Est-il envisageable que la vie se soit développée de manière totalement différente sur une autre planète, à partir d'autres éléments que les quatre cités ?

Pour répondre à ces questions, commençons par un bref aperçu de l'abondance des éléments dans l'Univers : par ordre décroissant on trouve l'hydrogène et l'hélium, puis l'oxygène, le carbone, le néon, le fer et l'azote. Cette hiérarchie dans les abondances s'explique par la physique nucléaire : nous ne nous attarderons pas là-dessus.

L'hydrogène et l'hélium sont de loin les plus abondants, car ils ont été formés dès le début de l'Histoire de l'Univers, peu après le Big

Bang. Tous les autres ont été créés plus tard dans les étoiles, et dispersés ensuite dans l'Espace (nous y reviendrons).

Parmi les éléments cités, l'hélium et le néon sont totalement inertes chimiquement (on les appelle des « gaz nobles ») : ils ne peuvent pas s'associer à d'autres atomes pour former des molécules et des édifices plus complexes. De plus, comme les atomes d'hélium ou de néon n'interagissent pas entre eux, il est très difficile de les unir pour former des liquides ou des solides : ils restent à l'état gazeux, qui est un état désordonné par excellence (les atomes virevoltent aléatoirement dans tous les sens).

Ainsi, ces deux éléments ne peuvent jouer aucun rôle dans l'architecture de la vie, qui est au contraire un système très ordonné.

Par ailleurs, le fer est de loin l'élément le plus lourd de tous ceux que nous avons cités : cinquante six fois plus lourd que l'hydrogène, et trois fois et demie plus lourd que l'oxygène. Ainsi, il tend systématiquement à plonger jusqu'au cœur des planètes, et son abondance en surface est moins importante que ce qui apparaît dans notre classement. De plus, nous verrons dans le prochain paragraphe que les propriétés chimiques du fer sont nettement moins intéressantes pour la vie que celles des autres éléments cités.

Finalement, il ne reste que quatre éléments parmi ceux présentés : l'hydrogène H, l'oxygène O, le carbone C et l'azote N. Ce sont précisément les quatre principales « briques » de la vie sur Terre : on voit que le choix de ces matériaux de base n'est pas un hasard. Remarquons que, si jamais la vie a choisi d'autres éléments que H, C, N et O pour se construire sur d'autres planètes, elle n'a certes pas choisi la voie la plus simple...

La proportion des éléments dans notre galaxie

La proportion est indiquée en nombre d'atomes (et non pas en masse). Seuls les sept éléments les plus abondants ont été reportés. La masse est celle de l'isotope principal.

Nom	Masse	Proportion
Hydrogène	1	73,9 %
Hélium	4	24,0 %
Oxygène	16	1,04 %
Carbone	12	0,460 %
Néon	20	0,134 %
Fer	56	0,109 %
Azote	14	0,0960 %

La prépondérance de l'hydrogène et de l'hélium, qui sont les deux seuls éléments créés dans le Big Bang, apparaît clairement. Par ailleurs, le fer se distingue nettement par sa masse élevée : l'étonnante abondance de cet élément très lourd est liée à l'exceptionnelle stabilité de son noyau.

La molécule, structure élémentaire de la vie

Définition **Molécule** : groupement d'atomes à l'origine des propriétés chimiques d'une substance. Lors d'une réaction chimique, les molécules se transforment en s'échangeant leurs atomes.

Un deuxième argument fort s'ajoute à cette première conclusion. Pour former des structures complexes, les atomes doivent être capables de se lier entre eux pour créer des molécules. Pour comprendre cette formation de molécules, il est nécessaire de comprendre ce qu'est un atome.

Un atome est constitué d'un noyau minuscule de charge positive,

environné par un ensemble d'électrons qui forment un « nuage » de charge négative, cent mille fois plus gros que le noyau. Or pour des raisons que nous mettrons ici de côté, il se trouve que la plupart des atomes ne sont pas « satisfaits » du nombre d'électrons qu'ils possèdent : certains souhaitent en perdre, d'autres en gagner. Les atomes appartenant à la famille des gaz nobles tels que l'hélium et le néon sont la seule exception, et c'est ce qui explique qu'ils soient inertes chimiquement (« ils sont bien comme ils sont »).

La plupart des atomes résolvent leur problème en expulsant ou en captant des électrons : ils forment alors des édifices chargés, appelés des « ions ». Mais certains atomes ne peuvent pas recourir à cette méthode. Par exemple, l'oxygène aimerait capter deux électrons, mais il en est incapable : en effet, un premier électron le chargerait négativement, ce qui repousserait un éventuel deuxième passant par là.

Une deuxième méthode existe donc, qui consiste pour un atome à se coller contre d'autres : il se retrouve « bien au chaud » au contact des électrons des atomes voisins, ce qui satisfait son besoin en électrons supplémentaires.

Les atomes concernés sont ceux qui ont envie de capter plus d'un électron, à savoir... le carbone, l'azote et l'oxygène ! Ce sont donc eux qui ont le plus tendance à se coller les uns aux autres pour former des molécules...

On pourrait aussi citer le silicium, le phosphore et le soufre, qui sont dans la même catégorie. Mais comme nous l'avons vu, ils sont moins abondants dans l'Univers que le carbone, l'azote et l'oxygène. Surtout, leur « appétit » d'électrons est nettement moins vorace, et leur réactivité chimique beaucoup moins marquée...

Finalement, nous retrouvons les trois briques fondamentales de la vie : C, N, O. L'hydrogène H est un peu à part, mais n'oublions

pas qu'il forme 92 % de la matière dans l'Univers en nombre d'atomes...

Pour résumer, la vie a besoin de créer une structure complexe et ordonnée, ce qui passe par la formation de molécules (« savant » assemblage de différents atomes). Chimiquement, les atomes C, N et O sont les plus concernés. De plus, ils sont parmi les plus abondants de l'Univers, aux côtés de l'hydrogène H. Cela explique que la vie se soit formée à partir des briques C, N, O, et H.

On peut toujours imaginer une vie extraterrestre radicalement différente, basée par exemple sur le silicium, le phosphore et le soufre, ou bien encore sur des édifices cristallins à base de fer. Mais a priori, la voie prise par la vie sur Terre semble de loin la plus logique. Il faut bien comprendre que la spécificité de tel ou tel environnement planétaire n'intervient pas dans cette conclusion : elle est basée sur les lois universelles de la physique, et sur l'abondance des éléments à l'échelle de l'Univers... Il paraît donc raisonnable de penser que si la vie a émergé indépendamment ailleurs que sur Terre, elle a de bonnes chances d'être basée sur les mêmes briques que celles structurant la vie terrestre.

La réactivité chimique des atomes

Le tableau ci-contre représente tous les éléments de la nature par leur symbole. C'est le fameux tableau périodique des éléments.

VEULENT PERDRE DES ÉLECTRONS																				VEULENT PERDRE DES ÉLECTRONS		VEULENT GAGNER DES ÉLECTRONS		STABLES (INERTES)											
1		2																		3		4		3		2		1							
HYDROGÈNE 1 H ← NOM DE L'ÉLÉMENT ← NUMÉRO ATOMIQUE ← SYMBOLE CHIMIQUE				PÉRIODIQUE		RADIONUCLÉAIRE		SYNTHÉTIQUE		NON DÉCOUVERT																		HÉLIUM 2 He							
LITHIUM 3 Li		BÉRYLLIUM 4 Be																		BORE 5 B		CARBONE 6 C		AZOTE 7 N		OXYGÈNE 8 O		FLUORE 9 F		NÉON 10 Ne					
SODIUM 11 Na		MAGNÉS IUM 12 Mg																		ALUMINIUM 13 Al		SILICIUM 14 Si		PHOSPHORE 15 P		SOUFRE 16 S		CHLORE 17 Cl		ARGON 18 Ar					
POTASSIUM 19 K		CALCIUM 20 Ca		SCANDIUM 21 Sc		TITANE 22 Ti		VANADIUM 23 V		CHROME 24 Cr		MANGANESE 25 Mn		FER 26 Fe		COBALT 27 Co		NICKEL 28 Ni		CUivre 29 Cu		ZINC 30 Zn		GALLIUM 31 Ga		GERMANIUM 32 Ge		ARSENIC 33 As		SÉLÉNIUM 34 Se		BROME 35 Br		KRYPTON 36 Kr	
RUBIDIUM 37 Rb		STRONTIUM 38 Sr		YTTERIUM 39 Y		ZIRCONIUM 40 Zr		NIOB IUM 41 Nb		MOYBÈNE 42 Mo		TECHNÉTIUM 43 Tc		RUTHÈNIUM 44 Ru		RHODIUM 45 Rh		PALLADIUM 46 Pd		ARGENT 47 Ag		CADMIUM 48 Cd		INDIUM 49 In		ÉTAIN 50 Sn		ANTIMOINE 51 Sb		TÉLURE 52 Te		IODE 53 I		XÉNON 54 Xe	
CÉSURIUM 55 Cs		BARIUM 56 Ba		LANTHANOÏDES * 57 71		HAFNIUM 72 Hf		TANTALE 73 Ta		TUNGSTÈNE 74 W		RÉNIUM 75 Re		OSMIUM 76 Os		IRIDIUM 77 Ir		PLATINE 78 Pt		OR 79 Au		MERCURE 80 Hg		THALLIUM 81 Tl		PLOMB 82 Pb		BISMUTH 83 Bi		POLONIUM 84 Po		ASTATE 85 At		RADON 86 Rn	
FRANCIUM 87 Fr		RADIUM 88 Ra		ACTINOÏDES ** 89 103		LUTÉTICIUM 104 Lr		DUBNIUM 105 Db		SEABORGIUM 106 Sg		BOHRIUM 107 Bh		HASIUM 108 Hs		MEITNERIUM 109 Mt		DARMSTADTIUM 110 Ds		ROENTGENIUM 111 Rg		COFERNIUM 112 Cn		UNUNTRIUM 113 Uut		UNUNQUADIUM 114 Uuq		UNUNPENTIUM 115 Uup		UNUNHEXIUM 116 Uuh		UNUNSEPTIUM 117 Uus		UNUNOCTIUM 118 Uuo	

Tableau périodique des éléments

Les chiffres en haut du tableau indiquent le nombre d'électrons que ces éléments veulent gagner ou perdre : ainsi le fluor voudrait former F^- , l'oxygène O^{2-} , l'azote N^{3-} et le carbone C^{4-} . Le problème est qu'un atome ne peut pas porter plus d'une charge négative, à cause de la répulsion électrostatique : l'oxygène, l'azote et le carbone ne peuvent donc pas former les ions voulus. Ils sont contraints de se coller à d'autres atomes pour bénéficier de la présence de leurs électrons. C'est ce qui les conduit à former des molécules.

Le même problème apparaît pour le soufre S, le phosphore P et le silicium Si. Mais le « besoin en électrons » décroît fortement du haut vers le bas dans le tableau, et la réactivité chimique de ces atomes est donc nettement plus faible.

Enfin, notons que l'hydrogène H est très « polyvalent » : il est prêt à perdre un électron (car il est à gauche dans le tableau), mais il est aussi prêt à en attirer (car il est en haut dans le tableau). Il est donc très à l'aise au contact d'atomes voisins dans une molécule.

Finalement, les éléments H, C, N et O sont les plus susceptibles de participer aux réactions chimiques en se réagissant dans les molécules.

L'eau et la vie

En se collant les uns aux autres, les atomes de carbone,

d'hydrogène, d'oxygène et d'azote forment des molécules. De même, en entrant en contact les unes avec les autres, les molécules peuvent échanger certains de leurs atomes, ou bien s'agréger pour former des molécules plus grosses et plus complexes.

L'édification d'une structure complexe passe donc par des réactions chimiques intenses. Un grand nombre de molécules doivent alors pouvoir interagir. Or dans un solide, les molécules ne peuvent pas se déplacer pour entrer en contact. D'autre part dans un gaz, les molécules extrêmement dispersées se croisent bien plus rarement que dans un liquide et donc interagissent moins : par exemple, l'air est mille fois moins lourd que l'eau pour un volume donné, car c'est un milieu bien plus raréfié. Finalement, seul le liquide est efficace pour mettre en contact le plus grand nombre de molécules possibles, et favoriser ainsi la réaction chimique.

Tous les liquides se valent-ils pour réaliser une chimie efficace ? Non, et un exemple va permettre de comprendre pourquoi.

Supposons qu'on souhaite faire réagir deux espèces organiques A et B distinctes : le but est d'obtenir des molécules encore plus complexes à partir de cette réaction. Supposons que A et B soient liquides (c'est le cas idéal...), et que A soit plus dense que B : si on les place dans un verre, A va se déposer au fond du verre, tandis que B surnagera. On dit qu'il se forme deux « phases » dans le verre. La réaction aura lieu, mais seulement à l'interface entre les deux phases, là où il y a contact entre A et B.

Pour favoriser considérablement la réaction, il faudrait que A et B se mélangent, de sorte que les contacts se fassent sur tout un volume et pas seulement à l'interface. L'astuce consiste alors à verser un troisième liquide C, constitué de molécules capables de se coller à la fois à l'espèce A et à l'espèce B. Ainsi, les espèces A et B sont emportées toutes les deux par les molécules C, et ne

forment donc plus deux liquides séparés : A et B se retrouvent bel et bien mélangées au sein du liquide C, qui a servi de « liant ». Elles peuvent alors réagir ensemble partout dans le volume, ce qui est bien plus efficace.

Un « bon » liquide favorisant la chimie doit donc être constitué d'une espèce capable de se coller à de nombreuses molécules, pour les entraîner toutes ensemble au cœur du liquide. En pratique, c'est l'attraction entre les charges contenues dans les atomes qui permet ce « collage ».

L'hydrogène H et l'oxygène O sont les deux éléments non inertes les plus abondants dans l'Univers. La molécule H_2O est donc l'une des plus faciles à créer. Or il se trouve que cette molécule possède justement des propriétés de « collage » considérables. D'une part, en se collant les unes aux autres, les molécules H_2O forment facilement un liquide (par opposition au gaz où les molécules sont séparées les unes des autres). D'autre part, une fois le liquide formé, elles tendent à se coller aux autres molécules, et à les mettre en contact sur tout le volume du liquide. Ainsi, en « dissolvant » un grand nombre d'espèces au sein d'une même solution, l'eau liquide favorise-t-elle considérablement les réactions chimiques.

Peut-on imaginer une autre espèce ayant des propriétés similaires ? Oui, mais aucune de ces espèces n'est aussi abondante que l'eau. On pourrait citer par exemple l'éthanol CH_3CH_2OH , présent dans les alcools, mais on voit qu'il s'agit d'une molécule bien plus complexe à former que l'eau, et qui plus est beaucoup moins efficace.

Finalement, de par sa simplicité et l'abondance de H et O dans l'Univers, et grâce à ses propriétés exceptionnelles de « collage », H_2O est de loin la molécule la plus abondante capable de favoriser les réactions chimiques. Là encore, on peut imaginer le

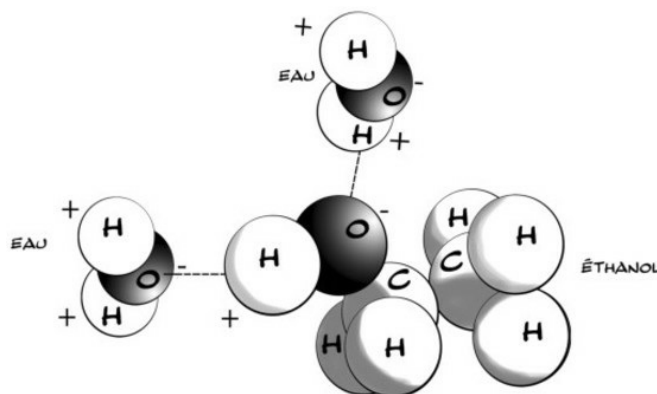
développement de la vie sans eau liquide sur une autre planète ; mais si c'est le cas, la vie n'aura certes pas choisi la voie la plus facile pour se développer !

Le principe de la solubilisation

Nous avons vu que l'oxygène avait un besoin majeur d'électrons supplémentaires. Ainsi dans la molécule d'eau H_2O , il tend à attirer les électrons vers lui, et se retrouve chargé négativement. En contrepartie, les atomes d'hydrogène se retrouvent chargés positivement. Il en va de même dans la molécule d'éthanol CH_3CH_2OH .

Plusieurs molécules d'eau vont alors pouvoir s'agglomérer à une molécule d'éthanol par attraction électrostatique, comme indiqué sur le schéma. L'éthanol se retrouve mélangé à l'eau : on dit qu'il est soluble dans l'eau.

En mélangeant ainsi de nombreuses molécules en solution, l'eau leur permet de se rencontrer et de réagir entre elles : c'est une condition indispensable pour former les édifices complexes du vivant.



Des molécules très particulières

La capacité de réplication est une caractéristique forte de la vie. Sur Terre, cette réplication est permise grâce à une molécule particulièrement complexe et ordonnée : l'ARN. Elle est constituée d'un long enchaînement non aléatoire de différents groupements d'atomes et possède donc une information très riche, par opposition au chaos désordonné de la matière inerte.

Par ailleurs, cette molécule peut favoriser certaines réactions chimiques entre d'autres molécules, en interagissant avec elles : c'est un catalyseur. C'est ce qui lui confère ses propriétés de réplication : la présence d'ARN permet de créer de nouvelles molécules d'ARN, identiques à l'original.

La réplication d'une molécule d'ARN isolée dans un environnement inerte paraît difficile : la structure ordonnée de l'ARN s'oppose de manière frontale au chaos de l'environnement. Par ailleurs, l'ARN serait très sensible à la moindre modification de son environnement : sa survie serait plus incertaine. En pratique, l'ARN est donc contenu « bien à l'abri » au cœur d'une cellule : la membrane cellulaire isole partiellement un milieu intérieur, complexe et organisé, d'un milieu extérieur dénué de structure. La cellule sert à la fois de protection pour l'ARN, et de « zone de transition » entre l'ordre de l'ARN et le désordre extérieur.

Par ailleurs, l'existence même de la cellule est permise grâce à l'ARN : grâce à ses propriétés de catalyseur, l'ARN crée des molécules assez complexes appelées « protéines ». Celles-ci sont elles-mêmes des catalyseurs qui permettent de développer et de dupliquer la cellule.

Seuls les virus sont des molécules d'ARN (ou d'ADN) qui ne sont pas protégées à l'intérieur d'une cellule. Mais les virus ont besoin d'une « cellule hôte » pour se répliquer : en effet, ce n'est qu'à l'intérieur d'une cellule qu'ils peuvent trouver un milieu suffisamment ordonné pour pouvoir répliquer leur ARN. Cela met en avant toute l'importance du lien qui existe entre l'ARN et la cellule : l'ARN permet la réplication de la cellule, et la cellule favorise la réplication de l'ARN.

Définition **Virus** : Molécule d'ARN ou d'ADN entourée d'une simple « coque » de protéines, incapable de se répliquer en l'absence d'une cellule hôte.

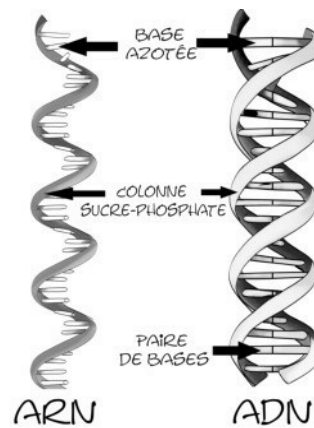
Quant à l'ADN (la fameuse « double hélice »), il s'agit d'une molécule plus stable et plus « aboutie » que l'ARN. Mais l'ADN n'a pas les propriétés de catalyseur de l'ARN : il ne peut pas se reproduire sans l'assistance des protéines créées par l'ARN, qui servent de catalyseurs à sa place. Ainsi, l'ADN est davantage dépendant d'autres structures ordonnées que l'ARN pour assurer sa réplication : il est probablement apparu plus tardivement dans l'évolution de la vie.

Finalement, si la vie a fini par « choisir » l'ADN et abandonner le monopole de l'ARN, c'est sans doute principalement grâce à la plus grande stabilité de l'ADN : certes il se reproduit plus difficilement que l'ARN, mais il est moins altéré par des « attaques extérieures » qui modifieraient sa structure. En quelque sorte, l'ADN est une meilleure sauvegarde de l'information que l'ARN.

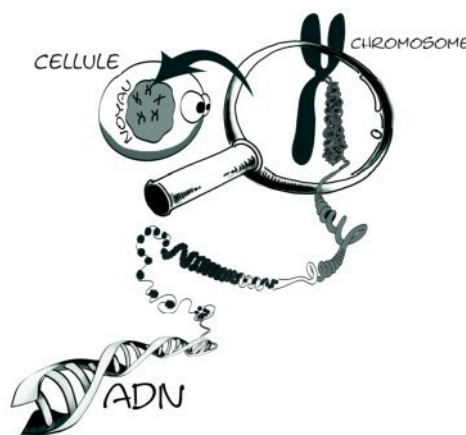
On pense d'ailleurs que l'ADN a émergé pour la première fois à partir de l'ARN en tant que simple virus, c'est-à-dire à l'extérieur de toute cellule. En effet, les virus sont davantage soumis aux influences extérieures perturbatrices, puisqu'ils ne sont pas protégés par une membrane cellulaire : leur besoin en stabilité est prépondérant, ce qui explique le passage de l'ARN à l'ADN. Selon cette théorie, l'ADN ne s'est transmis que plus tard à l'intérieur des cellules.

ARN, ADN, gènes et chromosomes

La molécule d'ARN est l'équivalent d'une simple hélice par rapport à la double hélice de l'ADN. Les autres différences entre les deux molécules restent assez minimes.



Seule une infime fraction de la molécule a été représentée : en pratique, l'ADN peut comporter plusieurs centaines de millions de bases (adénine, thymine, guanine, cytosine, soit A, T, G, C) enchaînées le long de la double hélice, et être longue de plusieurs centimètres. Elle est donc presque mille fois plus grande que le noyau d'une cellule : c'est le repliement de l'ADN qui lui permet d'y loger, un peu à l'instar de l'intestin dans le corps humain. L'enchaînement non aléatoire de tous ces groupements d'atomes est l'exemple type de la structure complexe et ordonnée caractéristique du vivant. L'immense information contenue dans la molécule d'ADN forme un code complexe : un gène est une portion d'ADN regroupant environ cent mille bases judicieusement agencées, et la molécule d'ADN contient plusieurs milliers de gènes. Enfin, le chromosome n'est autre que cette gigantesque molécule d'ADN associée à quelques protéines.

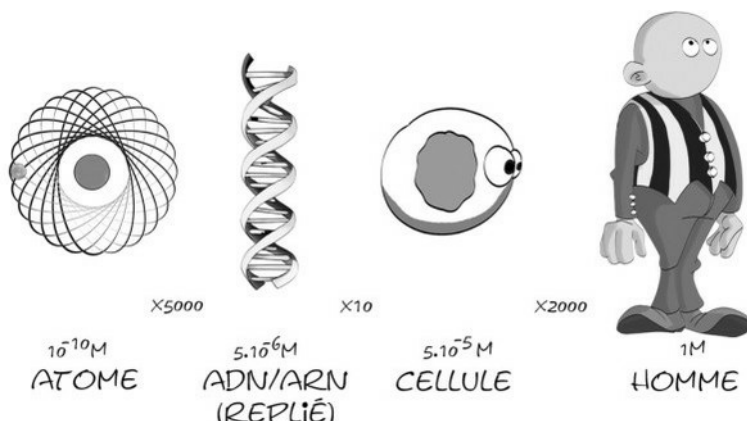


Finalement, la vie sur Terre est caractérisée par un « couple » élémentaire universel : l'ARN ou l'ADN, associé à la cellule. L'ARN/ADN permet le développement et la réplication de la cellule, la cellule crée l'environnement ordonné nécessaire à la

réplication de l'ARN/ADN...

Les échelles en jeu

Un être vivant est un édifice dont la structure met en jeu une gamme d'échelles considérable :



Nous retrouvons les deux grands niveaux de structuration de la vie sur Terre : celui de la cellule dont l'ADN est l'élément central, formé par un savant assemblage d'atomes. Et celui de l'organisme macroscopique (animal ou végétal), formé par un savant assemblage de cellules. Le rapport d'échelle est aussi grand entre l'ADN et l'atome qu'entre la cellule et l'Homme : cela donne une bonne idée de la formidable complexité de cette molécule d'ADN.

L'apparition des premières cellules

Voici un scénario plausible de l'émergence et de l'évolution de la vie sur Terre.

Dans un premier temps, les molécules à base de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote ont réagi chimiquement pour former des molécules plus complexes, à savoir des « molécules organiques ». Cette évolution semble être la plus facile à réaliser : plusieurs acides aminés ont pu être créés en laboratoire à partir de molécules simples.

L'expérience historique a été effectuée par Stanley Miller en 1953, mais il semble aujourd'hui que les conditions imposées étaient

assez éloignées de l'environnement de la Terre primitive. Plus récemment, l'idée a émergé que certaines de ces molécules organiques pourraient être venues de l'Espace. En effet, le milieu interstellaire semble être riche en molécules complexes. De plus, on a pu recréer certaines de ces molécules en laboratoire, en imposant des conditions semblables au milieu interstellaire. L'apport de molécules extraterrestres pourrait donc avoir joué un rôle dans la naissance de la vie sur Terre.

L'étape suivante semble nettement plus délicate : elle met en jeu le repliement des grosses molécules organiques jusqu'à ce qu'elles définissent un volume fermé. La membrane ainsi créée isole un milieu intérieur de l'environnement extérieur : la première cellule est née. Séparé du « chaos » extérieur, l'intérieur peut alors se structurer chimiquement.

Des molécules complexes et structurées apparaissent alors à l'intérieur de cette proto-cellule, capables de créer des « images » d'elles-mêmes en catalysant les réactions chimiques entre les autres molécules organiques : l'ancêtre de l'ARN apparaît.

Les chercheurs sont aujourd'hui incapables de reproduire ce scénario complexe en laboratoire. En fait, il y a là une interrogation majeure : la cellule, en tant que structure complexe ordonnée, a besoin de se dupliquer pour que l'information qu'elle contient ne disparaisse pas. Cette duplication est assurée par l'ARN ; or nous venons de voir que l'ARN avait besoin de la cellule pour émerger ! C'est tout le problème de l'œuf et de la poule : l'ARN a besoin de la cellule pour se créer, mais la cellule a besoin de l'ARN pour exister...

Il est donc possible que le développement de la molécule d'ARN se soit fait en parallèle avec le développement d'une cellule de plus en plus complexe. Une cellule simpliste n'a pas besoin de réactions chimiques très complexes pour se dupliquer, et la structure du proto-ARN peut alors rester assez proche de celle

d'une molécule organique « traditionnelle ». Plus la molécule d'ARN gagne en complexité, plus la cellule peut se structurer, permettant à l'ARN de croître davantage, et ainsi de suite... Ce cercle vertueux tend finalement à réaliser deux structures de plus en plus complexes qui ne peuvent pas exister l'une sans l'autre : l'ARN d'une part, et la membrane délimitant la cellule d'autre part. De fait, on a pu constater que certaines molécules tendaient naturellement à se replier sur elles-mêmes, formant l'embryon d'une séparation entre un milieu intérieur et extérieur. Il est toutefois impossible de dire si ce phénomène, associé au développement d'un embryon d'ARN à l'intérieur, pourrait être le point de départ d'une véritable cellule.

Définition **Cellule** : Unité auto-reproductrice qui est la base du vivant sur Terre. Elle est caractérisée par un milieu intérieur organisé contenant les molécules capables d'assurer la réplication (ARN ou ADN notamment). La membrane isole partiellement ce milieu structuré de l'environnement extérieur désorganisé, tout en permettant des échanges ciblés de matière et d'énergie.

Contre toute attente, le processus de création de la première cellule (incluant son ARN) s'est déroulé semble-t-il en un temps très réduit dans l'Histoire de la Terre : les premières cellules existaient déjà il y a 3,5 milliards d'années, ce qui signifie qu'elles sont apparues dans le premier quart de l'histoire la Terre. Comme l'environnement terrestre était très instable durant les premières centaines de millions d'années (bombardements météoritiques incessants, volcanisme débridé perturbant l'atmosphère, activité solaire chaotique, etc.), la précocité de la vie sur Terre est réellement remarquable. Par ailleurs, les plus anciennes roches présentes aujourd'hui à la surface datent de 3,8 milliards d'années : cela implique qu'aucune forme de vie plus précoce ne peut être décelée. Ainsi, il n'est pas exclu que la vie ait pu émerger

encore plus tôt.

La théorie de la panspermie suggère que ces premières cellules aient été apportées depuis l'Espace, et donc créées ailleurs que sur Terre. Cela expliquerait l'émergence précoce de la vie mais poserait finalement plus de questions que cela n'en résoudrait : des cellules éjectées de la surface d'une autre planète auraient traversé des années-lumière de distance dans l'Espace sans être altérées, et auraient finalement atteint la Terre, une poussière minuscule à l'échelle des distances interstellaires... De plus, encore aurait-il fallu que ces cellules survécussent malgré le choc thermique avec l'atmosphère ! La probabilité pour qu'une de ces cellules ait pu atteindre la surface terrestre saine et sauve apparaît donc comme totalement dérisoire, et le scénario d'une émergence rapide de la vie sur Terre semble plus probant. D'autant qu'aucune observation n'a jusqu'ici permis de détecter le moindre embryon de vie ailleurs...

La panspermie, une théorie improbable

Pour :

- La Terre reçoit de temps en temps des météorites qui ne sont autres que des fragments de la surface de la Lune ou de Mars. Cela montre que de la matière peut être arrachée d'une planète, et circuler dans l'espace avant d'atteindre la surface d'une autre planète. En pratique, seuls les gros impacts de météorites semblent capables d'arracher la matière de la surface, et l'expulser vers l'espace.
- Des cellules vivantes existent sur Terre depuis une époque très ancienne. On peut s'interroger sur les possibilités de formation de structures aussi complexes en un temps si court et dans un environnement encore instable.

Contre :

- L'étoile la plus proche du Soleil (Proxima du Centaure) est à 4,2 années-lumière de distance. Même si on considère que la plupart des systèmes planétaires peuvent abriter la vie, cela implique qu'il faudrait environ cent milliards de milliards de fragments de matière expulsés

dans l'espace avant que l'un d'eux ait une chance d'atteindre la Terre (étant donné la faible taille de la Terre devant les distances interstellaires). Ce nombre augmente rapidement si on s'intéresse à des étoiles plus lointaines.

- La Lune et Mars sont des corps légers et dénués d'atmosphère : il est probablement bien plus difficile d'arracher de la matière de planètes semblables à la Terre. L'impact nécessaire pourrait alors détruire toute forme de vie dans les éjectas.
- La vie semble s'être développée progressivement à la surface de la Terre, ce qui tend à indiquer que la matière peut former des édifices de plus en plus complexes de façon tout à fait locale. C'est encore plus évident dans les 500 derniers millions d'années, avec le développement progressif des végétaux et des animaux.

L'accumulation du dioxygène, une révolution pour la vie

Dès les débuts de l'Histoire de la Terre, des bactéries (cellules sans noyau) peuplent la surface de notre planète : que s'est-il passé pendant les 3,5 milliards d'années suivantes ? Pendant longtemps, la vie semble « dormir » sans réaliser de transformations majeures. Certes l'ADN émerge à partir de l'ARN, mais les cellules ne développent apparemment pas d'autres structures en leur sein ; par ailleurs, elles mènent chacune leur propre vie sans s'associer les unes aux autres.

Définition

Bactérie : Cellule autonome sans noyau. Les bactéries forment les organismes les plus élémentaires du règne du vivant sur Terre, et les plus primitifs.

Parallèlement, l'atmosphère terrestre change peu. La principale différence par rapport à aujourd'hui est l'absence d'oxygène^[1] dans l'air. Certes, les cyanobactéries apparues dès les origines de la vie rejettent de l'oxygène, grâce à la photosynthèse, mais celui-ci ne s'accumule pas dans l'atmosphère, jusque vers 2,2 milliards

d'années avant notre ère.

À cette date, nous observons un début d'oxydation des roches, qui reflète une augmentation de la teneur en dioxygène dans l'eau et dans l'air : l'oxygène commence enfin à s'accumuler. Or il s'agit d'une espèce très oxydante, donc chimiquement très réactive : une aubaine pour la vie qui va pouvoir exploiter cette énergie chimique contenue dans le dioxygène ! Encore lui faut-il s'adapter à ce nouvel environnement : si le dioxygène est très réactif, cela signifie aussi qu'il est capable de détruire facilement les cellules existantes en réagissant avec elles...

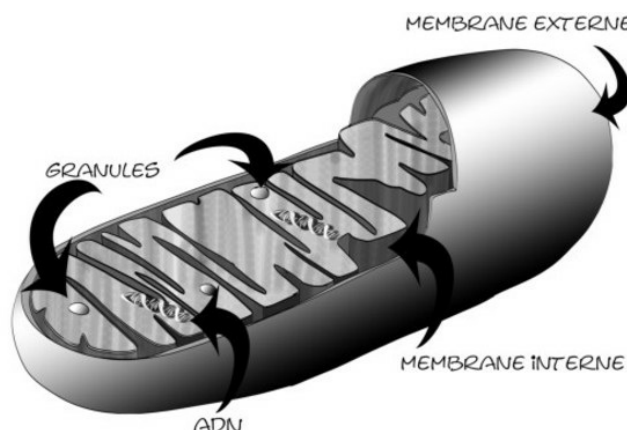
De fait, les cyanobactéries primitives, qui perdurent encore aujourd'hui, ne peuvent pas survivre en présence de dioxygène : il a donc fallu qu'elles s'adaptent il y a 2 milliards d'années, pour faire du dioxygène un allié plutôt qu'un poison. Effectivement, on observe à cette époque un bouleversement du vivant : tout d'abord, l'ADN se réfugie dans un noyau au cœur de la cellule, et se protège ainsi davantage de l'environnement extérieur, devenu plus « agressif ». Cela forme une cellule dite « eucaryote », par opposition aux anciennes cellules « procaryotes » démunies de noyau.

Définition **Procaryotes/Eucaryotes** : Dans une cellule eucaryote, l'ADN ou l'ARN s'est réfugié à l'intérieur d'un noyau, au cœur de la cellule. À l'inverse, une cellule procaryote ne possède pas de noyau. Les eucaryotes sont apparus lorsque le dioxygène a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère.

Par ailleurs, la cellule développe une nouvelle structure susceptible d'exploiter cette nouvelle manne qu'est le dioxygène de l'air : il s'agit de la mitochondrie, qui forme en quelque sorte le « poumon » de la cellule. Grâce à elle, la cellule eucaryote a pu commencer à utiliser le dioxygène de l'air et bénéficier de sa grande réactivité chimique. Cela lui a permis de réaliser bien

d'autres structures aux côtés de la mitochondrie, jusqu'à former l'édifice complexe présent dans les cellules du corps humain aujourd'hui.

La mitochondrie, « poumon » de la cellule



La mitochondrie utilise le dioxygène pour transformer certaines molécules organiques en ATP : les molécules d'ATP contiennent l'énergie chimique directement utilisable par les cellules. La mitochondrie permet donc de transformer l'énergie du dioxygène en énergie utilisable.

La vie modifie l'atmosphère terrestre

Si les conséquences de l'environnement terrestre sur le développement de la vie sont bien visibles, une question s'impose : pourquoi l'oxygène a-t-il subitement commencé à s'accumuler dans l'atmosphère vers 2,2 milliards d'années avant notre ère, alors qu'il était absent auparavant ? Les cyanobactéries créaient pourtant du dioxygène dès les origines, il y a 3,5 milliards d'années...

La réponse réside peut-être à l'intérieur de la Terre. À ses débuts, l'intérieur de la Terre était très chaud, grâce à l'énergie de sa contraction et la forte radioactivité de certains éléments lourds. Le volcanisme se chargeait d'éjecter ce trop-plein d'énergie, en remontant une grande quantité de matière vers la surface.

Cette matière est très métallique, car les métaux sont des éléments lourds dont la concentration est plus grande à l'intérieur de la Terre, du fait de la gravité. Or les métaux sont des espèces « réductrices », par opposition aux espèces « oxydantes » telles que le dioxygène. Ces matériaux réducteurs venus de l'intérieur de la Terre ont donc naturellement créé un environnement hostile au dioxygène : le dioxygène était détruit au fur et à mesure qu'il était formé, car il réagissait avec ces métaux.

Définition **Oxydant/Réducteur** : Un réducteur est une molécule capable de donner des électrons à une autre molécule. Un oxydant est une molécule capable d'en recevoir. Un bon oxydant et un bon réducteur ont donc tendance à réagir naturellement ensemble, ce qui conduit à un réagencement des molécules.

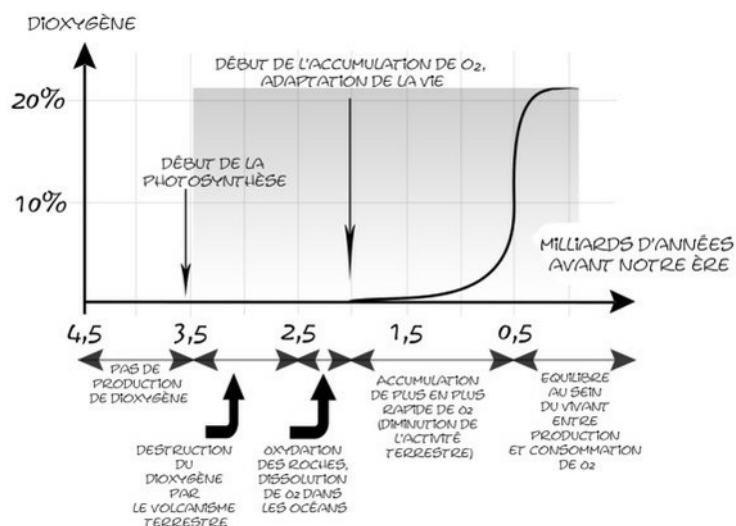
Tant que les volcans étaient « virulents », le dioxygène ne pouvait donc pas s'accumuler. Mais l'énergie interne de la Terre tend à diminuer de façon continue depuis sa naissance, car la quantité d'éléments radioactifs décroît régulièrement. En se refroidissant, la Terre a éjecté de moins en moins de matière réductrice : à une certaine époque, la proportion de matière réductrice est devenue insuffisante pour détruire tout le dioxygène formé par la photosynthèse. Aussi le dioxygène a-t-il commencé à s'accumuler, sans doute il y a 2,2 à 2,5 milliards d'années.

Notons qu'à l'heure actuelle, ce scénario est une simple hypothèse très plausible. Elle permet de mettre en avant un constat intéressant : le développement de la vie semble être très rapide dès lors que l'environnement planétaire le permet. Ainsi les cellules procaryotes sont apparues au début de l'histoire du Système Solaire, alors que l'environnement terrestre était tout juste stable, et les cellules eucaryotes dès que la Terre a cessé de relâcher d'énormes quantités de matériaux réducteurs depuis ses entrailles... Cela donne l'impression d'un développement facile de

la vie, à l'opposé d'une hypothétique succession d'événements improbables conduisant à la complexité actuelle. Il ne s'agit pas d'un développement lent, progressif et aléatoire : l'évolution de la vie n'est limitée que par l'évolution parallèle de l'environnement à l'échelle planétaire.

Évolution du taux de dioxygène et développement de la vie

Le graphique ci-dessous représente l'allure de l'évolution probable du taux de dioxygène dans l'atmosphère, sachant que les données concernant les périodes anciennes restent très incertaines.



L'évolution du taux de dioxygène est le résultat d'une compétition permanente entre sa production et sa consommation. Autrefois, l'activité terrestre était responsable d'une grande part de la destruction du dioxygène : la diminution progressive du volcanisme explique que l'augmentation du taux de dioxygène ait été de plus en plus rapide.

Plus le taux de dioxygène augmente, plus il est consommé massivement par les êtres vivants : cela explique le nouvel équilibre qui s'est mis en place pendant les 500 derniers millions d'années. La vie a remplacé le volcanisme comme puits principal de dioxygène.

La « révolution » du Cambrien

L'accumulation du dioxygène dans l'atmosphère terrestre est loin d'être brutale : la production de dioxygène par la vie reste partiellement compensée par sa destruction du fait du volcanisme, de l'oxydation des roches, ou encore par sa dissolution dans les océans. Pendant ce temps, l'évolution de la vie ne concerne pas seulement l'intérieur des cellules : des groupes de cellules interdépendantes formant des organismes pluricellulaires apparaissent aussi.

Néanmoins, ce passage au pluricellulaire n'apparaît pas comme une révolution dans le développement de la vie : il semble s'être produit de nombreuses fois de façon totalement indépendante dans son Histoire. Il est d'ailleurs naturel que le vivant, complexe et ordonné, ait besoin du vivant pour se développer : par exemple, l'Homme a besoin de manger des végétaux ou des animaux pour vivre, ce qui montre sa totale dépendance au règne du vivant. La formation d'organismes pluricellulaires est une manifestation particulière de cette interdépendance.

Définition **Protozoaires/Métazoaires** : Un métazoaire est un organisme vivant constitué d'un assemblage structuré de cellules eucaryotes. Les protozoaires sont des cellules eucaryotes autonomes : elles peuvent s'assembler en colonies, mais sans constituer un organisme vivant. Dès leur apparition, les cellules eucaryotes ont formé ces deux types d'édifices.

Après la révolution survenue il y a 2 milliards d'années, les évolutions restent toutefois timides jusqu'à une date soudain très précise : – 565 millions d'années... Elle correspond à l'apparition des premiers organismes pluricellulaires assez gros pour être vus à l'œil nu. D'un coup, la vie semble émerger en pleine lumière et prendre les formes les plus diverses : c'est la raison pour laquelle on parle « d'explosion du Cambrien » pour mettre en avant cette révolution apparente.

Toutefois, si cette période nous paraît importante, c'est simplement parce que, à compter de cette date, les évolutions sont sensibles à notre échelle, ce qui les rend plus « visibles ». Les organismes n'en restent pas moins des agrégats structurés de cellules qui existent depuis des milliards d'années... La révolution d'il y a 2,2 milliards d'années, avec l'apparition du dioxygène, marque une rupture bien plus nette mais moins évidente car cantonnée à l'intérieur de la cellule.

Qu'est-ce qui a permis l'apparition soudaine d'organismes de grande taille ? L'épisode intervient juste après une glaciation sévère à l'échelle de la planète entière, ce qui explique son apparente brutalité liée à la modification soudaine du climat. Mais ce n'était certes pas le premier épisode glaciaire dans l'Histoire de la Terre : une raison bien plus fondamentale doit donc être intervenue.

N'oublions pas que l'accumulation du dioxygène dans l'atmosphère se poursuit : à cette époque, il atteint enfin une concentration très élevée dans l'atmosphère. La densité d'énergie associée a alors peut-être dépassé un seuil, permettant un nouveau développement du vivant.

Surtout, cette concentration de dioxygène devient telle que la molécule d'ozone commence à apparaître. Celle-ci est constituée de trois atomes d'oxygène, contre deux pour le dioxygène. Or la molécule d'ozone a pour propriété d'arrêter les rayonnements ultraviolets nocifs venus du Soleil : la couche d'ozone tient ce rôle encore aujourd'hui.

À cette époque, l'ozone commence donc à protéger les cellules vivantes de ces rayonnements : la vie, jusqu'alors à l'abri sous l'eau pour se protéger des UV, peut enfin se rapprocher de la surface, et bénéficier de toute l'énergie du rayonnement visible. La fin d'une période glaciaire de grande ampleur, qui a redonné un

environnement plus favorable à la vie, a sans doute renforcé le caractère brutal de cette évolution.

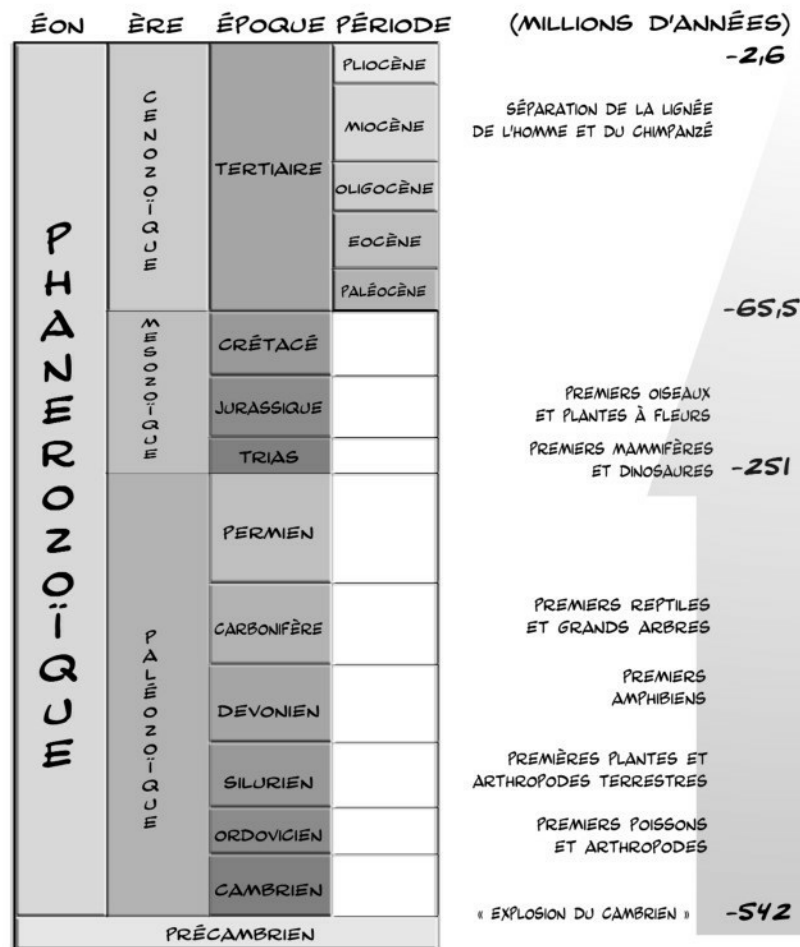
Évolution de la faune et de la flore

La vie macroscopique apparaît d'abord sous forme de « corps mous ». Rapidement, une séparation se crée entre les animaux et les végétaux. Celle-ci est liée à l'existence de deux principales sources d'énergie sur Terre : la flore optimise l'utilisation de l'énergie solaire, tandis que la faune optimise l'utilisation de l'énergie du dioxygène. Nous y reviendrons dans la suite de ce livre.

Les poissons et les arthropodes apparaissent assez tôt, tandis que les premières plantes colonisent la surface terrestre. Les premiers animaux à gagner la terre ferme, vers 430 millions d'années avant notre ère, sont des arthropodes (qui incluront les insectes). Les amphibiens gagnent à leur tour la terre ferme vers – 370 millions d'années. Tandis que les grands arbres font leur apparition, les amphibiens évoluent ensuite pour former les reptiles. Après une extinction majeure il y a 251 millions d'années, dont l'origine demeure inconnue, s'ouvre l'époque des dinosaures. Les plantes à fleurs et les oiseaux émergent vers 150 millions d'années avant notre ère.

Une nouvelle extinction il y a 65 millions d'années, due à l'impact d'une météorite, éradique les dinosaures et permet aux mammifères jusqu'alors marginaux de prospérer. En particulier, les primates conduisent à l'apparition de l'australopithèque il y a peut-être 5 millions d'années, et du genre Homo il y a environ 2,5 millions d'années.

ÉVOLUTION DE LA VIE DEPUIS LE CAMBRIEN



L'Homme, un animal exceptionnel

La bipédie, associée au comportement social des primates, a sans doute favorisé le développement du cerveau chez ce nouvel animal, mais les causes du développement massif de l'intelligence et de la conscience chez l'Homme restent très méconnues. Ce que l'on peut constater en revanche, c'est que l'intelligence des animaux a globalement augmenté ces derniers cinq cents millions d'années, même si cela s'est fait de manière non linéaire.

Ainsi, les mammifères et les oiseaux, derniers apparus dans l'évolution des espèces, regroupent tous les animaux les plus intelligents : singes, dauphins, chevaux, éléphants, mais aussi

pies, corbeaux et perroquets... Il paraît nettement plus difficile d'apprivoiser des animaux plus primitifs tels que les lézards (reptiles), les requins (poissons), ou les libellules (insectes), faute de capacités cognitives suffisantes !

Finalement, il semble que le développement de l'intelligence ait été globalement lent et progressif, avant d'atteindre un seuil permettant son explosion brutale au sein de l'espèce humaine. Cela signifie que même si l'Homme venait à s'éteindre, un autre animal finirait peut-être par le remplacer en quelques millions d'années : la séparation entre les grands singes et l'Homme il y a 2,5 millions d'années montre que les primates ont atteint un niveau d'intelligence suffisant dès cette époque.

À ce sujet, une question se pose : si le règne animal a atteint ce fameux « seuil d'intelligence », pourquoi l'Homme est-il la seule espèce « d'intelligence supérieure » ? De nouvelles espèces intelligentes devraient régulièrement émerger à l'échelle de quelques millions d'années...

En fait, l'Histoire de l'espèce humaine nous apprend qu'un animal intelligent ne tolère guère de rivaux : de nombreuses espèces intelligentes ont effectivement émergé à l'époque des australopithèques et des premiers Homo, jusqu'à l'époque de Néandertal. Mais toutes ont fini par disparaître sous la domination de ce qui deviendra Homo Sapiens. Ainsi, il semble qu'une espèce intelligente soit toujours en concurrence particulièrement farouche avec toute autre espèce intelligente, sans doute car elles occupent la même niche au sein de l'environnement.

Cela tend à indiquer qu'aucune nouvelle espèce intelligente ne pourra émerger sur Terre tant que l'Homme existera. La menace d'extinction des grands singes ne contredira d'ailleurs pas ce constat...

Par ailleurs, on peut supposer que le développement d'un reptile humanoïde intelligent à l'époque des dinosaures était sans doute

impossible, le règne animal n'ayant pas développé les capacités cognitives nécessaires. Que se serait-il passé si les dinosaures n'avaient pas été éradiqués par une météorite il y a 65 millions d'années, permettant aux mammifères de prendre le relais ? L'intelligence aurait probablement poursuivi son développement malgré tout, et il n'est pas exclu qu'un être intelligent aurait fini par émerger à partir d'une évolution des dinosaures... Les oiseaux, descendants des dinosaures, regroupent d'ailleurs certaines des espèces animales les plus intelligentes aujourd'hui, malgré leur confinement dans une niche écologique bien particulière (le vol requiert un faible poids qui ne favorise pas les gros cerveaux...).

Pourquoi le développement de l'intelligence chez l'animal semble-t-il aussi inéluctable ? Nous tenterons de répondre à cette question dans le prochain chapitre, quand nous nous intéresserons aux possibilités d'émergence de l'intelligence ailleurs que sur Terre.

L'émergence de l'intelligence humaine

Quelles circonstances ont permis le développement brutal de l'intelligence chez l'espèce humaine ? Cette question est fondamentale pour qui souhaite étudier les possibilités d'émergence d'une vie intelligente extraterrestre.

Le développement de l'intelligence chez les animaux répond à un objectif simple : il s'agit d'acquérir et de défendre plus efficacement sa nourriture, en particulier par le biais de comportements de groupe. Il n'est donc pas surprenant que la sélection naturelle ait permis l'essor d'animaux de plus en plus intelligents. Mais il semble exister un fossé considérable entre l'Homme et le chimpanzé : l'Homme apparaît comme le seul animal terrestre à pouvoir développer une civilisation technologique, et de loin...

Pour comprendre ce qui a pu se passer, il faut prendre en compte un premier constat : l'espèce humaine est issue d'un ancêtre des grands singes actuels (chimpanzés, gorilles, orangs-outangs). Or ces singes vivent tous dans les régions humides près de l'équateur (Afrique pour les chimpanzés et les gorilles, Indonésie pour les orangs-outangs). De fait, il s'agit des régions abritant la vie la plus foisonnante (grande quantité

d'énergie solaire, abondance de l'eau) : les ressources en nourriture y sont donc importantes, mais en retour la concurrence particulièrement acharnée. On peut comprendre que ce type de situation favorise tout particulièrement le développement de l'intelligence : l'énergie y est suffisante pour alimenter le fonctionnement du cerveau, et la concurrence est là pour pousser l'intelligence à des niveaux de plus en plus élevés.

Par ailleurs, la taille importante de l'ensemble Europe-Afrique-Asie, en offrant des écosystèmes nombreux et variés, a permis de mettre un très grand nombre d'espèces en interaction, ce qui fut sans doute particulièrement favorable à l'évolution des espèces : cela pourrait expliquer l'absence de grands singes en Amérique, malgré la présence de zones équatoriales humides. L'exemple de l'Australie, encore bien plus petite, confirme que le développement des espèces est beaucoup plus lent lorsque l'espace est plus limité.

L'archéologie montre que de nombreuses espèces se sont développées parallèlement à partir des grands singes (australopithèques, puis hominidés) : il n'y eut donc pas une seule espèce d'animal qui se démarqua subitement des autres, mais bien un ensemble d'espèces plus ou moins intelligentes. Ce ne fut que plus tard qu'*Homo sapiens* finirait par faire le vide autour de lui, en éliminant un à un tous ses rivaux. C'est sans doute ce qui explique le fossé d'aujourd'hui entre l'Homme et le chimpanzé : ce fossé, c'est l'Homme lui-même qui l'a creusé, en supprimant toutes les autres espèces intelligentes avec qui il était en compétition sur Terre...

Ce scénario est plutôt encourageant dans la perspective de trouver une vie intelligente sur une autre planète, car l'intelligence humaine n'apparaît plus comme une surprenante exception : sur Terre, c'est l'Homme qui empêche d'autres espèces intelligentes de se développer, non la Nature...

Complexité croissante, stabilité constante

En résumé, les nombreuses extinctions et les évolutions parallèles qui se sont produites dans l'Histoire de la vie ne doivent pas nous détourner de ce constat : la vie a globalement poursuivi l'établissement de structures ordonnées de plus en plus complexes à partir du Cambrien, comme elle l'avait fait jusqu'alors.

Pendant plusieurs milliards d'années, cette complexification croissante a concerné l'intérieur de la cellule. Puis le passage de l'organisme microscopique au poisson a bouleversé la structure à grande échelle de la vie : apparition du squelette et des organes par exemple, qu'on retrouvera chez l'Homme beaucoup plus tard. Enfin, tandis que la vie gagnait la terre ferme, l'évolution de la structure a surtout concerné le cerveau et le développement d'une intelligence de plus en plus marquée.

Cette évolution dans la complexification n'est évidemment pas linéaire, mais apparaît comme une constante à grande échelle temporelle : cela tend à montrer qu'il s'agit d'une tendance forte, en dépit de tous les événements susceptibles d'intervenir pour orienter la vie dans telle ou telle direction.

Cette évolution est liée au fait que la Nature choisit indistinctement tous les processus physiquement possibles : si un ensemble de réactions chimiques peut se produire dans un environnement donné, il finit toujours par avoir lieu, même s'il s'agit d'un enchaînement complexe parmi beaucoup d'autres possibles. La « sélection naturelle » choisit alors les structures les plus « robustes » : en pratique, il s'agit de structures stables et capables de se dupliquer. Ainsi, la création d'un organisme plus complexe n'est pas due au fait qu'il est plus stable que l'organisme primitif qui lui a donné naissance, cela signifie simplement qu'il est tout aussi stable et qu'il a donc sa place dans la Nature au même titre que les organismes plus simples.

Plutôt que de voir l'Évolution comme la création d'organismes complexes succédant aux organismes primitifs, il faut donc la voir comme un agrégat d'organismes de plus en plus nombreux, depuis les plus simples jusqu'aux plus complexes, à mesure que la Nature crée de nouvelles structures stables. Les organismes complexes apparaissent après les organismes simples car une structure complexe ne peut pas naître « en un jour » depuis un

chaos inerte, ce qui n'implique pas une « stabilité supérieure » de ces structures complexes.

Par exemple, les méduses sont des organismes simples apparus avant même le Cambrien ; pourtant, elles subsistent encore aujourd'hui, ce qui prouve leur très grande robustesse. À l'inverse, les Hommes, qui sont des organismes très « aboutis », n'ont pas encore prouvé leur stabilité sur le long terme...

Le développement de la vie, un processus inéluctable ?

Par ailleurs, les possibilités de création restent limitées par l'environnement planétaire : l'évolution de la vie est très rapide dès que l'environnement est favorable, jusqu'à stagner en attendant une nouvelle modification de l'environnement. Trois sauts importants, intimement liés aux changements survenus dans l'environnement planétaire, eurent lieu dans l'Histoire de la vie sur Terre :

- La naissance de la vie suit la stabilisation de l'environnement terrestre primitif.
- La structuration de l'intérieur des cellules (noyau, mitochondries, etc.) suit de près l'accumulation de dioxygène dans l'atmosphère.
- Le développement d'organismes pluricellulaires macroscopiques accompagne l'accumulation d'ozone dans la haute atmosphère.

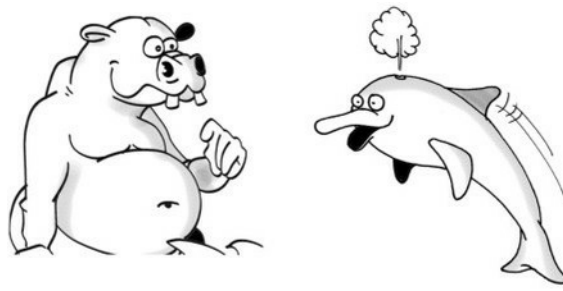
La voie qu'a choisie la vie sur Terre n'apparaît donc pas comme une évolution hasardeuse liée à des événements improbables. La vie semble emprunter toutes les voies de développement possibles avec une grande célérité, et celles qui conduisent à des structures stables émergent naturellement. L'intérêt de ce scénario

est qu'il est « robuste », peu sensible aux événements catastrophiques susceptibles de survenir et de le perturber, comme le montre l'Histoire de la vie sur Terre.

L'édifice du vivant pourrait même être un système peu « chaotique », c'est-à-dire que deux conditions initiales voisines mèneraient à deux évolutions similaires de la vie. Dans ce cas, si on reprenait une nouvelle Terre dotée d'un environnement initialement similaire, un scénario comparable se reproduirait.

La Nature nous en offre quelques indices. Par exemple, le dauphin est un mammifère qui est repassé du milieu terrestre au milieu marin ; or, à première vue, le dauphin ressemble plus à un requin qu'à un Homme... En revenant dans le même environnement que les poissons, les mammifères ont naturellement repris une apparence similaire. L'apparition des formes de vie macroscopique sur Terre ne semble donc pas être le fruit du hasard, qui aurait pu conduire à des formes totalement différentes : la vie tend inéluctablement à reformer des spécimens similaires, quel que soit le point de départ.

Les origines du dauphin et du requin



LE DAUPHIN EST UN MAMMIFÈRE NÉ IL Y A 60 MILLIONS D'ANNÉES À PARTIR D'UN ANCÊTRE DE L'HIPPOPOTAME



LE REQUIN EST UN POISSON NÉ IL Y A 430 MILLIONS D'ANNÉES. IL EST SANS DOUTE ISSU DE L'ÉVOLUTION DE LA LARVE D'ASCIDIE, QUI FORME LE MAILLON PRIMITIF ENTRE INVERTÉBRÉS ET VERTÉBRÉS

Par ailleurs, la vie s'adapte naturellement à tout changement irréversible dans les conditions environnementales : ainsi la vie s'est-elle adaptée aux changements considérables de température et d'espèces chimiques survenus dans l'Histoire. De plus, elle a pu s'adapter à des conditions radicalement différentes de celles régnant à la surface, en colonisant notamment les abords des sources hydrothermales présentes dans les dorsales sous-marines. Bien sûr, ces conclusions n'impliquent pas que le développement de la vie sur une autre planète serait facile : malgré sa robustesse, la vie a tout de même nécessité des conditions environnementales bien particulières pour mener jusqu'à l'Homme. Que la Terre ait été plus grosse donc plus active, et elle aurait continué à éjecter ses éléments réducteurs, empêchant l'accumulation de dioxygène dans l'atmosphère et maintenant la vie au stade de cellules sans noyau. Il s'agit d'un exemple parmi bien d'autres qui montre que tous les environnements planétaires sont sans doute loin de pouvoir développer une vie intelligente...

C'est ce point qui va nous intéresser dans le chapitre suivant :

nous essaierons de nous détacher au maximum de ce « scénario de référence » qu'est l'évolution de la vie sur Terre, de sorte à envisager des voies éventuellement différentes.

Notes

[\[1\]](#) « L'oxygène » que nous respirons est en réalité du « dioxygène » O_2 , molécule constituée de deux atomes d'oxygène O. Dans la suite, afin d'éviter la confusion avec l'élément oxygène O, on préférera parler de « dioxygène » plutôt que « d'oxygène » pour la molécule O_2 .

Où trouver de la vie ?

« Ce n'est pas seulement le nombre d'atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers ».

Épicure, IV^e – III^e siècle av. J.-C.

L'ensemencement progressif de l'Univers

Intéressons-nous d'abord aux atomes nécessaires à la vie : hydrogène, oxygène, carbone, azote (pour ne citer que les plus abondants). Où les trouver ? A priori, ces éléments sont présents un peu partout dans l'Univers. Mais nous avons vu que seuls l'hydrogène et l'hélium étaient apparus peu après le Big Bang : les autres ont été créés de façon plus progressive, dans les étoiles massives en fin de vie.

Le scénario est le suivant : le Big Bang est survenu il y a environ 14 milliards d'années. Les nuages d'hydrogène et d'hélium créés dans le Big Bang se sont très tôt contractés en raison de la gravitation, jusqu'à former des concentrations considérables de matière : les premières étoiles étaient nées. Dès le début elles étaient rassemblées en amas gigantesques : les galaxies. Ainsi notre propre galaxie, constituée de centaines de milliards d'étoiles, naît-elle assez tôt dans l'Histoire de l'Univers, peut-être au bout d'un milliard d'années seulement.

Définition

Galaxie : Vaste amas d'étoiles liées ensemble par la gravitation. La Voie Lactée dont fait partie notre

Système Solaire en contient plusieurs centaines de milliards, et s'étend sur 80 000 années-lumière.

La pression et la température qui règnent à l'intérieur des étoiles permettent le déclenchement de la fusion de l'hydrogène, qui forme de l'hélium : l'énergie dégagée maintient la température des étoiles à une valeur élevée, ce qui explique la lumière émise. La pression du rayonnement compense l'action de la gravitation et empêche l'étoile de se contracter davantage.

Définition **Étoile** : Boule de gaz contracté par gravitation, où la pression et la température sont suffisantes pour déclencher la fusion de l'hydrogène, formant de l'hélium. Cette fusion confère la quasi-totalité de l'énergie des rayonnements émis par l'étoile.

Les étoiles s'approchent de leur fin de vie lorsqu'elles ont épuisé une grande partie de l'hydrogène présent dans leur cœur : leur contraction peut alors reprendre, ce qui augmente encore la pression à l'intérieur. Des réactions nucléaires plus difficiles peuvent alors débiter : ce sont elles qui créent les premiers éléments plus lourds que l'hélium, notamment le carbone, l'azote et l'oxygène. Pour les étoiles les plus massives, la « nucléosynthèse » permet même de former des éléments très lourds tels que le fer.

Cette phase de création d'éléments plus lourds que l'hélium n'intervient qu'à la fin de la vie d'une étoile ; c'est pourtant elle qui crée tous les éléments nécessaires à la vie... Les étoiles les plus massives finissent par exploser en supernovæ, et c'est cette explosion qui dissémine les éléments créés dans l'Espace. Le Soleil, trop peu massif, ne connaîtra pas cette phase explosive : il ne contribuera donc que faiblement à ensemercer l'Univers de nouveaux éléments lourds.

Définition **Supernova** : Explosion finale des étoiles les plus massives, qui permet de disséminer dans l'Espace une partie des éléments créés par fusion.

Plus l'étoile est massive, plus sa durée de vie est faible, car les réactions nucléaires y sont beaucoup plus intenses et le combustible nucléaire consommé plus rapidement. Ainsi, le Soleil a une durée de vie d'une dizaine de milliards d'années, mais les étoiles très massives conduisant à des supernovæ vivent seulement quelques dizaines de millions d'années.

Les éléments éjectés par les supernovæ se répandent ensuite dans la galaxie, et viennent s'ajouter à l'hydrogène et à l'hélium résiduels issus du Big Bang. L'expansion issue de la supernova est très rapide, et l'onde de choc qui se produit peut conduire à la contraction des nuages qu'elle rencontre, formant ainsi de nouvelles étoiles.

À la différence des toutes premières étoiles, ces nouvelles étoiles formées possèdent des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium, issus des supernovæ précédentes. Plus le temps passe, plus la galaxie s'enrichit ainsi en éléments tels que le carbone, l'azote et l'oxygène, au fur et à mesure que les étoiles en produisent et en expulsent dans l'Espace. Petit à petit, les nuages de gaz interstellaires contiennent de plus en plus d'éléments lourds, depuis le carbone jusqu'au fer.

Lorsque l'Univers atteint un certain âge (encore très mal défini aujourd'hui), les éléments lourds qu'il contient deviennent suffisamment abondants pour s'agréger entre eux et former des « poussières ». La contraction d'un nuage de gaz et de poussières entraîne alors non seulement la naissance d'une étoile, mais aussi de « grumeaux » de matière solide tout autour, constitués de ces éléments « lourds » (oxygène, silicium, fer...). Les premiers systèmes planétaires apparaissent.

À mesure que le temps passe et que l'Univers s'enrichit en éléments lourds, les noyaux rocheux ainsi formés augmentent en taille. En particulier il y a 4,6 milliards d'années, naissent le Soleil et son cortège de planètes, parmi tant d'autres systèmes planétaires dans la galaxie.

Les populations d'étoiles

On subdivise généralement les étoiles en trois « populations » distinctes, en fonction de leur âge :

- Population I : il s'agit des étoiles riches en éléments lourds, et qui ont donc été formées il y a moins de 10 à 11 milliards d'années. La présence de systèmes planétaires autour de telles étoiles est sans doute très fréquente. La très grande majorité des étoiles de notre galaxie appartient à cette population.
- Population II : il s'agit des étoiles les plus vieilles, d'un âge compris entre 11 et 13,5 milliards d'années environ. Elles se sont formées à une époque où l'Univers contenait encore peu d'éléments lourds. Seules les étoiles les moins massives subsistent encore aujourd'hui. L'existence de systèmes planétaires autour de telles étoiles paraît peu probable. Elles sont toutefois extrêmement minoritaires dans la galaxie.
- Population III : Aucune étoile de cette population ne subsiste aujourd'hui, mais on soupçonne qu'elles devaient être très nombreuses au tout début de l'Histoire de l'Univers. Il s'agit d'étoiles presque uniquement constituées de l'hydrogène et de l'hélium originel, nées peu après la naissance de l'Univers. Étant donné la densité d'hydrogène et d'hélium à l'origine, ces étoiles devaient être incroyablement massives, ce qui expliquerait qu'elles aient toutes disparu depuis longtemps (très faible durée de vie).

La présence de ces étoiles bien plus massives que celles actuelles, explosant toutes rapidement en supernovæ colossales, explique que l'ensemencement de l'Univers en éléments lourds ait été extrêmement rapide à cette époque. Ainsi, la quantité d'éléments autres que l'hydrogène et l'hélium n'a pas augmenté de façon linéaire : presque tout a été créé dans les premiers milliards d'années, et la situation a ensuite peu changé depuis une dizaine de milliards d'années.

Ni trop tôt, ni trop tard...

Ce scénario implique une conséquence importante : la vie n'a pas pu se former dans les tout premiers âges de l'Univers, faute de la présence d'éléments tels que le carbone, l'oxygène et l'azote. En fait, plus le temps passe, plus la composition de l'Univers favorise la naissance de la vie...

Les observations montrent que les éléments lourds ont commencé à apparaître de façon extrêmement précoce dans l'Histoire de l'Univers : cela tend à indiquer que les premières étoiles formées devaient être nombreuses et très massives, ce qui leur a permis d'ensemencer rapidement l'Espace en éléments lourds.

Il est toutefois impossible de dire à quelle époque les premiers systèmes planétaires sont nés. Par ailleurs, les premières planètes formées devaient sans doute être moins massives que les suivantes : il a sans doute fallu attendre un peu avant de voir apparaître les premières « Terre ».

Dans tous les cas, il paraît clair que les quatre premiers milliards d'années de l'Univers étaient peu favorables à l'émergence de la vie... Il est donc peu pertinent de rechercher la vie extraterrestre autour des étoiles les plus vieilles, puisque celles-ci possèdent des systèmes planétaires pauvres, voire inexistantes.

Notons que cela ne concerne que certaines étoiles appelées « naines rouges », les moins massives de toutes. En effet, ce sont les seules dont la durée de vie dépasse l'âge actuel de l'Univers : il subsiste donc encore aujourd'hui des naines rouges datant des premiers âges. Quant aux étoiles plus massives et plus lumineuses qui nous entourent, telles que le Soleil, elles sont nécessairement apparues beaucoup plus tard.

Définition **Naine rouge** : Étoiles rougeoyantes peu massives et peu lumineuses. Ce sont les étoiles les plus abondantes dans l'Univers. Leur durée de vie est supérieure à l'âge actuel de l'Univers, et la population de naines rouges croît donc peu à peu encore

À l'inverse, imaginons une vie extraterrestre qui serait apparue plus tardivement que celle sur Terre : cette vie aurait donc eu moins de temps pour se développer et créer de « l'intelligence ». Bien entendu, on peut imaginer un environnement plus favorable qui lui aurait permis d'atteindre ce stade de l'intelligence plus rapidement. Mais il suffit de noter que plus la vie est récente, moins grandes sont les chances qu'elle soit intelligente.

Ainsi, il n'est pas pertinent de rechercher la vie autour d'étoiles beaucoup plus massives que le Soleil car de telles étoiles ont des durées de vie de quelques centaines de millions d'années, trop court pour mener jusqu'à des organismes intelligents... Les étoiles très lumineuses et bleutées (signe d'une très grande masse) sont donc de mauvaises candidates.

Finalement, une vie extraterrestre intelligente ne peut être ni très vieille, ni très jeune. Cela exclut des recherches les environnements des grosses étoiles bleues d'une part, et des plus vieilles naines rouges d'autre part. Cela laisse en lice un grand nombre de naines rouges, ainsi que les étoiles similaires au Soleil.

Notons au passage que les étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel nocturne ne reflètent pas du tout la population réelle d'étoiles dans la galaxie. En particulier, les naines rouges sont de loin les plus abondantes dans l'Univers, car elles ont une durée de vie très longue : leur population ne cesse donc de s'accroître depuis le Big Bang. Pourtant, aucune naine rouge n'est visible dans le ciel, car elles sont trop peu lumineuses. Même Proxima du Centaure ne peut être observée à l'œil nu, bien que ce soit l'étoile la plus proche du Soleil (4,2 années-lumière de distance) !

À l'inverse, les étoiles très massives sont surreprésentées dans le ciel par rapport à leur abondance réelle. Parmi elles, citons par exemple Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel nocturne...

Les différents types d'étoiles

On peut schématiquement classer les étoiles en plusieurs catégories selon leur éclat, chacune étant représentée par une lettre :

- Type « O » : Ce sont des étoiles bleues, extrêmement massives et lumineuses, dont la durée de vie est de l'ordre du million d'années. Elles sont extrêmement rares dans la galaxie, du fait même de leur courte durée de vie, mais elles sont particulièrement visibles... En fin de vie, elles explosent en supernovæ et peuvent devenir des trous noirs.
- Type « B » : Étoiles bleutées et très lumineuses vivant une dizaine de millions d'années. Les plus massives explosent en supernovæ et forment des « étoiles à neutrons ».
- Type « A » : Étoiles blanches vivant quelques centaines de millions d'années, assez communes. Étant donné leur forte luminosité, elles sont surreprésentées dans le ciel nocturne, et beaucoup d'étoiles visibles à l'œil nu sont de ce type. La plupart sont trop peu massives pour former une supernova en fin de vie, et se contentent de laisser « tranquillement » place à une « naine blanche ».
- Type « F » : Ces étoiles sont très similaires à celles de type « A », mais généralement moins massives. Leur durée de vie peut être de un à quelques milliards d'années, ce qui implique que le développement d'une vie intelligente est possible autour de telles étoiles. Elles sont nombreuses dans le ciel nocturne.
- Type « G » : Étoiles jaunes telles que le Soleil, dont l'âge est de l'ordre de la dizaine de milliards d'années. Elles sont plus nombreuses que les étoiles précédentes, mais, étant moins lumineuses, semblent plus rares dans le ciel nocturne.
- Type « K » : Étoiles orangées, fréquentes dans la galaxie mais en général invisibles à l'œil nu. La plupart sont des naines dont la durée de vie est supérieure à l'âge de l'Univers. D'autres en revanche sont des étoiles en fin de vie devenues des géantes (voir ci-dessous).
- Type « M » : Ce sont des étoiles rougeoyantes, les plus abondantes dans la galaxie, « naines rouges » dans leur grande majorité. Pourtant, aucune n'est visible dans le ciel nocturne à cause de leur faible luminosité.

Par ailleurs, les étoiles approchant de leur fin de vie et commençant à fabriquer du carbone, de l'azote et de l'oxygène, grossissent du fait de l'intense pression de rayonnement, jusqu'à former des « géantes rouges », qui sont aussi de type M en général. Les géantes rouges sont très rares dans la galaxie puisqu'il ne s'agit que d'un « état de transition » (phase

d'« agonie » de l'étoile). Mais du fait de leur taille gigantesque, beaucoup d'entre elles sont visibles dans le ciel nocturne, bien que situées à grande distance : par exemple, Bételgeuse est si grosse qu'elle s'étendrait jusqu'à la ceinture d'astéroïdes si on la mettait à la place du Soleil, englobant Mercure, Vénus, la Terre et Mars...

Notons que pour retenir l'ordre des lettres caractérisant la classe d'étoile, il suffit de mémoriser la phrase anglaise : « Oh Be A Fine Girl, Kiss Me ! » (Oh, sois gentille et embrasse-moi !)

De l'importance des systèmes planétaires pour l'eau liquide

Nous avons vu que l'un des critères majeurs favorisant la vie était la présence d'eau liquide, « accélérateur efficace de réactions chimiques ». Un premier constat s'impose : l'état liquide est physiquement impossible dans le vide spatial. Une pression minimale est nécessaire pour qu'un liquide se forme : en pratique, seules de grandes quantités de solide ou de gaz comprimés par gravitation peuvent créer une telle pression.

Dans le cas de l'eau liquide, cette pression minimale est de 6 mbar, c'est-à-dire 167 fois moins que la pression atmosphérique à la surface de la Terre. Pour se donner un ordre d'idée, c'est précisément la pression qui règne à la surface de Mars : l'eau liquide ne peut pas exister sur Mars, mais c'est tout juste...

Le deuxième facteur pilotant l'existence de l'eau liquide est bien sûr la température : sous 1 bar comme sur Terre, la température doit être comprise entre 0 °C et 100 °C. De façon plus générale, quelle que soit la pression, des températures inférieures à 0 °C interdisent l'état liquide. En revanche, plus la pression augmente, plus l'eau peut rester liquide à température élevée : 350 °C environ sous 200 bars... C'est tout l'intérêt de la cocotte-minute, où l'eau liquide dépasse les 100 °C grâce à la pression élevée, accélérant ainsi la cuisson des aliments.

Où trouve-t-on de telles conditions de température et de pression dans l'Univers ? Des planétoïdes ou des étoiles peuvent générer les pressions nécessaires, mais la température d'une étoile est bien entendu trop élevée. Finalement, seuls des corps de type planétaire peuvent abriter l'eau liquide.

Pour déterminer où l'eau peut être trouvée dans un système planétaire, il est nécessaire de comprendre comment ce dernier se forme. À l'origine, ce sont des poussières solides issues d'un nuage originel qui s'agrègent en grumeaux, tandis que la majeure partie de la matière s'effondre dans l'étoile en train de naître. Lorsque ces poussières deviennent suffisamment grosses, elles se mettent à attirer la matière résiduelle du nuage par gravitation : le noyau rocheux grossit tandis que les gaz, plus légers, sont dégagés en surface pour former une atmosphère.

Les gaz présents autour du corps rocheux dépendent alors de deux principaux paramètres : la masse du corps d'une part, qui tend à attirer et à retenir les gaz ; l'intensité du rayonnement solaire d'autre part, qui tend à éjecter les gaz dans l'Espace.

Les gaz les plus légers présents dans le nuage originel sont le dihydrogène et l'hélium : ce sont les premiers à s'échapper dans l'Espace si la masse du corps est trop faible et l'intensité du rayonnement solaire trop élevée. Or ces deux gaz sont de loin les plus abondants dans le Système Solaire (souvenons-nous que l'hydrogène et l'hélium sont issus du Big Bang originel, contrairement aux autres éléments). Ainsi, il se crée rapidement une divergence entre deux types de corps :

À proximité du Soleil, les rayonnements sont intenses, ce qui empêche l'accumulation de dihydrogène et d'hélium dans l'atmosphère. Cela conduit à des corps rocheux entourés d'une faible épaisseur d'atmosphère : il s'agit de planètes telluriques. Les quatre planètes les plus proches du Soleil sont de ce type :

Mercure, Vénus, la Terre et Mars.

Plus loin, la faiblesse des rayonnements solaires permet au dihydrogène et à l'hélium de s'accumuler : cela augmente considérablement la masse du corps, ce qui permet d'attirer encore plus de gaz légers, et ainsi de suite... Le dihydrogène et l'hélium en viennent à dominer largement la composition de la planète : il s'agit de géantes gazeuses. Les quatre planètes les plus éloignées du Soleil sont de ce type : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Les planètes du Système Solaire

Planète	Distance au Soleil (Terre = 1)	Diamètre (Terre = 1)	Densité
Mercure	0,39	0,38	5,4
Vénus	0,72	0,95	5,2
Terre	1	1	5,5
Jupiter	5,2	11,2	1,3
Saturne	9,5	9,4	0,7
Uranus	19,2	4,0	1,2
Neptune	30,1	3,9	1,6

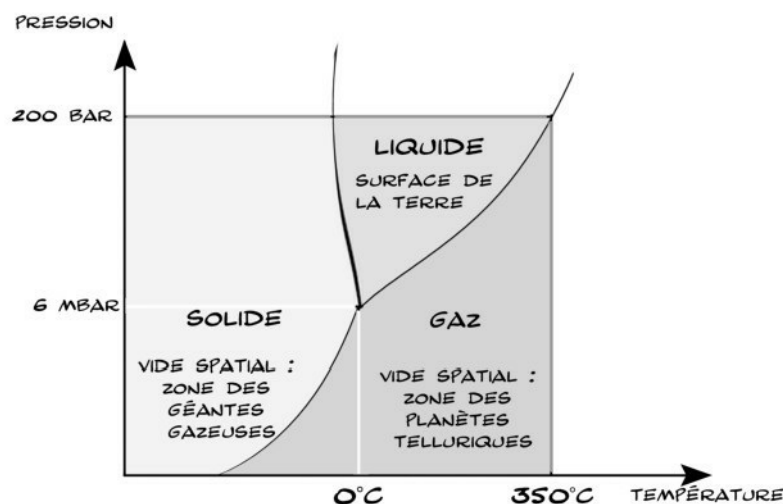
Les planètes du Système Solaire se subdivisent nettement en deux catégories : celles proches du Soleil sont denses et de faible taille, il s'agit des planètes telluriques. Celles éloignées du Soleil sont grosses et peu denses, il s'agit des géantes gazeuses.

Dans le Système Solaire, cette séparation nette entre les planètes telluriques et les géantes gazeuses est associée à une rupture tout aussi nette en ce qui concerne la présence d'eau.

- Loin du Soleil, la température est suffisamment faible pour que l'eau soit présente sous forme de glace. L'eau H_2O étant abondante dans l'Univers, elle s'est ajoutée de façon non négligeable à la masse des corps rocheux. Ainsi, la plupart des satellites des géantes gazeuses sont très riches en glace d'eau.
- Près du Soleil, la température est trop élevée pour permettre à l'eau de rester sous forme solide dans le vide spatial. De plus, les rayonnements solaires « agressifs » tendent à y casser les molécules H_2O en atomes d'hydrogène H et d'oxygène O, détruisant la vapeur d'eau. Cela conduit à des planètes telluriques naturellement très pauvres en eau. C'est le cas même sur Terre, où l'eau des océans ne forme qu'une minuscule pellicule à la surface de la planète !

L'eau dans tous ses états

Le diagramme ci-dessous représente les différents états de l'eau (solide, liquide ou gaz) en fonction de la pression et de la température.



On voit que l'état liquide ne peut exister en dessous d'une certaine pression, et notamment dans le vide spatial. Par ailleurs, la température augmente de la région externe vers la région interne du Système Solaire : la région des géantes gazeuses se situe donc à gauche dans le diagramme, correspondant au domaine de la glace d'eau, et la région des planètes telluriques à droite, où la glace d'eau est quasi-absente.

L'eau liquide dans les confins

Définition **Géante gazeuse** : Planète dont le noyau rocheux a été suffisamment massif pour retenir l'hélium et le dihydrogène. Ces gaz en viennent à dominer la composition de la planète.

Dans la zone externe du Système Solaire, l'eau reste invisible dans les géantes gazeuses car d'épaisses couches de gaz la dissimulent ; en revanche, elle est bien visible à la surface des satellites qui orbitent autour, sous forme de glace.

Par ailleurs, la glace, plus légère que le noyau rocheux des satellites, s'est naturellement accumulée en surface tandis que les éléments lourds plongeaient à l'intérieur. C'est la raison pour laquelle beaucoup d'entre eux apparaissent comme des « boules de glace », bien que la glace n'occupe en réalité que les régions supérieures de ces corps.

Est-il possible de trouver de l'eau sous forme liquide dans les régions externes des systèmes planétaires ? L'énergie du Soleil y est trop faible pour élever la température au-dessus des 0 °C fatidiques... Mais ce n'est pas la seule source d'énergie ! Les planètes dégagent elles aussi leur propre énergie. Cela peut être l'énergie gagnée par la contraction gravitationnelle, ou encore celle conférée par la décomposition d'éléments radioactifs dans leur cœur : ainsi la température augmente quand on s'enfonce à l'intérieur de Jupiter et des autres géantes gazeuses.

Le problème est qu'elle augmente trop vite pour espérer y trouver de l'eau liquide : l'eau étant enfouie sous des dizaines de milliers de kilomètres de gaz, la température et la pression ont des valeurs colossales là où elle se trouve, ce qui ne lui permet pas d'exister sous forme liquide... Notons que dans ces conditions, c'est l'hydrogène lui-même qui se trouve à l'état liquide ! L'hydrogène liquide est toutefois loin d'avoir les mêmes propriétés chimiques

que l'eau liquide...

Quant aux satellites orbitant autour des géantes gazeuses, les deux processus de création de chaleur cités (contraction et décomposition radioactive) restent faibles en général, en raison de leur trop petite taille. On peut toujours imaginer des satellites plus gros dans d'autres systèmes planétaires, qui continueraient à dégager beaucoup d'énergie. Mais le juste milieu semble délicat à trouver : si le corps rocheux est trop gros, il retient les gaz légers et devient une géante gazeuse ; s'il est trop petit, son énergie intrinsèque reste faible...

Les satellites des géantes gazeuses bénéficient toutefois d'un apport d'énergie extérieur supplémentaire : celui dû à l'attraction gravitationnelle de leur planète. Le mécanisme est le suivant : la face du satellite tournée vers la planète subit une attraction gravitationnelle plus forte que le côté opposé, puisqu'il en est plus proche. Le satellite se retrouve donc « écartelé » par ce différentiel d'attraction : c'est le phénomène de « marée ». Or dans certains cas, la distance à la planète ne reste pas parfaitement constante : par exemple, les satellites s'influencent mutuellement, ce qui les dévie de leur trajectoire. Ainsi, ils se retrouvent plus ou moins écartelés à mesure qu'ils se rapprochent et s'éloignent de la planète : en d'autres termes, ils sont « malaxés » en permanence.

C'est ce processus de « malaxage » qui apporte de l'énergie au satellite : celle-ci entraîne une augmentation de température à l'intérieur, qui peut être considérable. Ainsi Io, le gros satellite le plus proche de Jupiter, est tellement chauffé par ce mécanisme qu'il possède une activité volcanique débridée se chargeant d'expulser ce trop-plein d'énergie.

Le satellite Europe, qui se trouve un peu plus loin de la planète, est fortement chauffé lui aussi par le phénomène de marée, bien que de façon moindre par rapport à Io. L'élévation de température, associée à l'augmentation rapide de pression sous la

surface, y autorise l'existence d'eau liquide. De fait, l'existence d'un océan global d'eau liquide sous la surface glacée d'Europe est une quasi-certitude.

Il en est peut-être de même pour Ganymède, pourtant plus éloignée encore de Jupiter. Le phénomène de marée y est toutefois nettement plus faible, et la température n'est donc suffisante qu'à très grande profondeur : ainsi, l'épaisseur de glace en surface y est bien plus considérable.

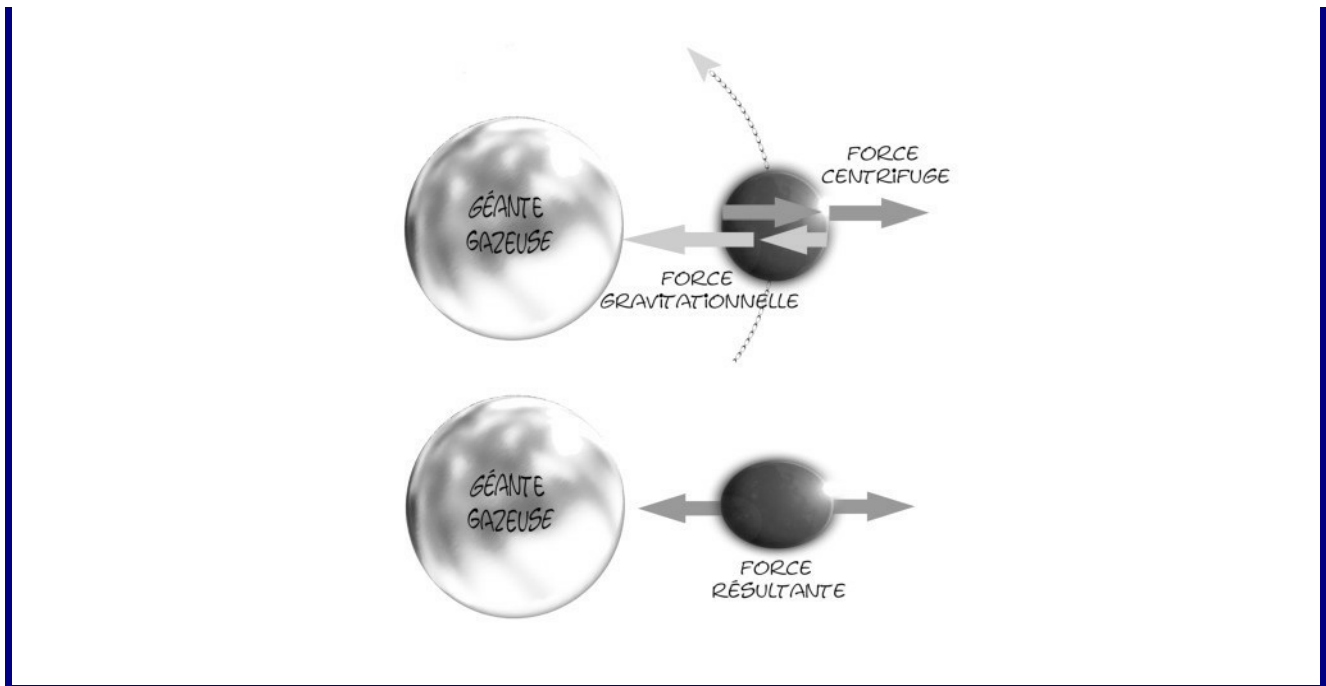
Le phénomène des marées

Lorsqu'une voiture amorce un virage à gauche, une force tend à déporter les passagers vers la droite : il s'agit de la force centrifuge. De même, un satellite qui tourne autour d'une planète est en « virage à gauche » permanent, et subit donc une force « vers la droite ». Cette force centrifuge compense la force d'attraction gravitationnelle due à la planète, dirigée au contraire « vers la gauche ».

La force ressentie à la surface du satellite est la somme de ces deux forces contraires. Or, la force gravitationnelle est plus importante du côté tourné vers la planète : la force centrifuge ne suffit pas à la compenser à cet endroit. À l'inverse, sur l'autre face, c'est la force centrifuge qui domine.

Finalement, la force ressentie n'est pas dirigée dans le même sens d'un côté et de l'autre du satellite : cela tend à l'écarteler (deuxième schéma). C'est le phénomène des marées.

Pour peu que la distance à la planète varie périodiquement, l'ampleur du phénomène de marée est sans cesse modifiée, ce qui « malaxe » le satellite : il oscille constamment entre la forme d'un ballon de football et d'un ballon de rugby... Cela chauffe fortement l'intérieur du satellite et lui fournit donc une source d'énergie qui pourrait être très précieuse pour la vie...



Nous venons d'identifier nos premiers sites potentiels d'eau liquide ! De même, de tels environnements favorables doivent exister autour de beaucoup d'autres étoiles, dans les régions externes de leurs environnements planétaires.

L'eau liquide pourrait même se trouver à la surface de ces corps et non plus seulement en profondeur, à condition qu'ils soient assez gros pour maintenir une atmosphère de pression supérieure à 6 mbar...

Cette pression est largement dépassée sur Titan, le gros satellite de Saturne (où elle est même supérieure à la pression sur Terre...). Mais Titan est loin de Saturne, et les autres satellites sont trop petits pour le perturber fortement : le phénomène de « malaxage » lié aux marées y est donc négligeable, et la température en surface reste très insuffisante pour autoriser de l'eau liquide (elle est de $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$!). Les exemples de Io (forte température) et de Titan (forte pression de surface) montrent toutefois que l'association d'une pression supérieure à 6 mbar et d'une température localement supérieure à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ n'est pas exclue à la surface d'un satellite externe d'un autre système planétaire.

On peut même aller plus loin : l'exemple d'Europe montre que la

chaleur nécessaire à l'existence de l'eau liquide ne vient pas nécessairement d'une étoile : cela signifie que de l'eau liquide pourrait être trouvée a priori à l'écart de toute étoile !

En pratique, la contraction d'un nuage de gaz n'aboutit pas forcément à une étoile : si la quantité de matière est faible, la pression au cœur de l'astre reste insuffisante pour déclencher les réactions de fusion nucléaire : on dit qu'on a alors affaire à une « naine brune ». Un tel astre ne brille pas comme une étoile, et dégage donc une énergie bien plus faible. Mais des planètes gravitant autour pourraient néanmoins abriter de l'eau liquide, à condition que les autres sources d'énergie soient suffisantes (forces de marée, énergie liée à la contraction de la naine brune, etc.).

Définition

Naine brune : Boule de gaz suffisamment massive pour déclencher la fusion du deutérium, mais trop peu massive pour déclencher la fusion de l'hydrogène comme dans une étoile. La majorité de l'énergie d'une naine brune provient de sa contraction gravitationnelle ; elle est émise sous forme de rayonnements infrarouges. Il s'agit d'un astre intermédiaire entre la géante gazeuse et l'étoile.

On pourrait même imaginer des planètes isolées de tout astre, perdues dans le vide interstellaire, qui posséderaient des satellites dotés d'eau liquide grâce aux forces de marée... Notons toutefois que l'abondance de telles planètes isolées au sein de la galaxie reste totalement inconnue à ce jour.

Les principaux satellites du Système Solaire

Satellite	Planète	Diamètre (km)	Densité (eau = 1)
Triton	Neptune	2 700	2,1
Titan	Saturne	5 150	1,9
Callisto	Jupiter	4 820	1,8
Ganymède	Jupiter	5 260	1,9
Europe	Jupiter	3 120	3,0
Io	Jupiter	3 640	3,5
Lune	Terre	3 470	3,3

L'eau a une densité très faible par rapport aux corps rocheux à base de métaux et de silicates. Cela explique que les satellites se subdivisent nettement en deux catégories : ceux de faible densité, riches en glace d'eau, et ceux de forte densité, qui contiennent peu ou pas d'eau.

La proximité du Soleil explique l'absence d'eau sur la Lune (zone des planètes telluriques), l'énergie due aux forces de marée l'absence d'eau sur Io : toute l'eau originelle s'est transformée en vapeur et s'est échappée.

Le cas d'Europe est intéressant : sa forte densité montre qu'une grande partie de son eau s'est échappée, là encore du fait des forces de marée. Mais le processus n'est pas arrivé à son terme : il reste une fine croûte de glace à la surface, surnageant sans doute au-dessus d'un océan d'eau liquide.

Voici une explication possible : en perdant son eau sous forme de vapeur, la taille d'Europe a dû diminuer au début de son Histoire (il en va de même pour Io). Ce faisant, le phénomène de malaxage s'est affaibli, jusqu'à ce que l'eau reste sous forme solide en surface et stoppe son processus d'échappement. Sur Io au contraire, le malaxage était bien plus intense (plus grande proximité de Jupiter), et toute l'eau s'est enfuie.

Ainsi, Europe est un « cas de transition » : elle possède beaucoup d'eau, mais en quantité négligeable par rapport aux débuts de son histoire. Si Io et Europe n'avaient pas subi de phénomène de marée, ils mesureraient environ 5 600 km et 4 400 km de diamètre respectivement, et seraient presque deux fois plus massifs grâce à l'eau supplémentaire.

Notons enfin que Titan est le seul satellite à posséder une atmosphère (1,5 bar de diazote). En pratique, c'est le seul à combiner une masse élevée (gros diamètre) et une grande distance au Soleil (orbite de

Saturne) : ainsi les rayonnements de notre étoile n'ont pas pu y arracher tous les gaz.

L'eau liquide près des étoiles

Définition **Planète tellurique** : Planète dont le noyau rocheux a été trop peu massif pour retenir l'hélium et le dihydrogène. Il s'agit donc d'un corps essentiellement solide, éventuellement recouvert d'une fine couche liquide (océans) et gazeuse (atmosphère).

Rapprochons-nous à présent du Soleil, dans la région des planètes telluriques. L'eau n'y étant pas présente à l'état solide, elle ne s'est pas accumulée sous forme de glace à la surface des planètes, contrairement aux régions plus lointaines. Par ailleurs, nous avons vu que les radiations solaires tendaient à casser les molécules d'eau dans l'Espace.

Une question se pose alors naturellement : d'où vient l'eau présente sur Terre ? Encore aujourd'hui, il n'existe pas de consensus pour expliquer ce « mystère », mais deux principaux scénarios peuvent être envisagés.

Dans le premier scénario, les molécules d'eau auraient pu se former à l'abri des radiations à l'intérieur des poussières et des « grumeaux » solides présents dans le nuage originel. La vapeur d'eau serait ainsi restée prisonnière de cette gangue solide, jusqu'à ce que les poussières s'agrègent et forment un embryon de planète. Du fait de la gravité, la matière solide aurait alors commencé à se contracter, expulsant du même coup les gaz présents à l'intérieur. On peut se le représenter en imaginant une éponge gorgée d'eau qu'on presse : l'eau rejaillit naturellement à l'extérieur.

Une fois la vapeur d'eau dégazée, elle n'aurait plus été protégée des radiations solaires par la gangue solide. Mais d'autres gaz

auraient été éjectés simultanément de l'intérieur de la planète, notamment le dioxyde de carbone et le diazote : ces autres gaz auraient protégé la vapeur d'eau des radiations solaires.

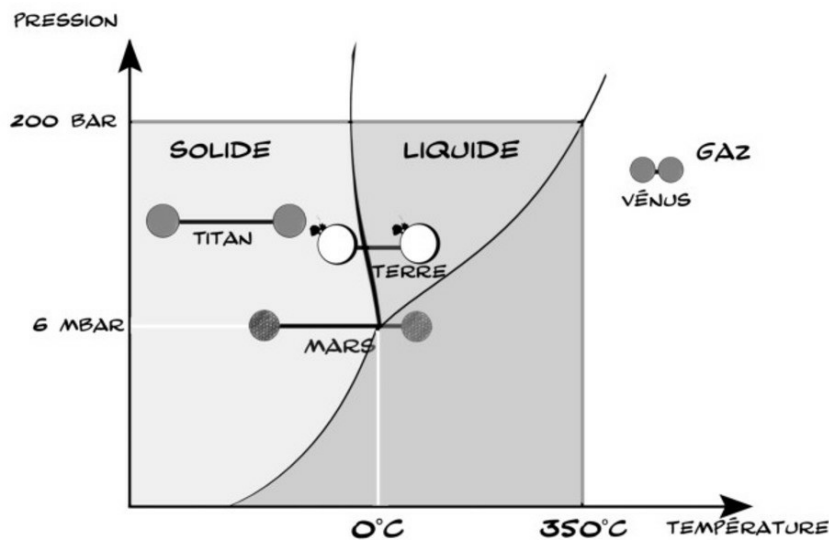
Sur Terre, les conditions de température et de pression auraient permis à l'eau de passer à l'état liquide, sous forme de pluies torrentielles continues, au fur et à mesure que l'eau s'évaporait des entrailles de la planète, jusqu'à former les océans actuels. À l'abri sous son atmosphère protectrice, l'eau aurait pu enfin trouver une nouvelle stabilité jusqu'à aujourd'hui.

Sur Vénus ou sur Mercure en revanche, la proximité du Soleil aurait imposé une température trop élevée pour permettre le passage de l'eau à l'état liquide. Restée sous forme de vapeur, l'eau aurait été peu à peu détruite par les radiations solaires dans les hautes couches de l'atmosphère, brisée en atomes d'oxygène et d'hydrogène. Ces derniers, très légers, se seraient alors échappés définitivement dans l'Espace.

Quant au cas de Mars, son histoire a sans doute été similaire à celle de la Terre dans un premier temps, avec la formation d'eau liquide. L'eau liquide a toutefois fini par disparaître de la surface martienne : nous en verrons les raisons plus loin.

L'eau sur les corps dotés d'une atmosphère

Nous avons reporté ci-dessous les états de l'eau en fonction de la pression et de la température, en y ajoutant la position des corps du Système Solaire dotés d'atmosphère (Vénus, la Terre, Mars et Titan).



Si la Terre est le seul corps capable de posséder de l'eau liquide en surface, le cas de Mars interpelle : il se trouve exactement à la limite d'existence de l'eau liquide... Ce n'est sans doute pas un hasard : nous y reviendrons dans la suite de ce livre.

Dans le deuxième scénario, les planètes telluriques se seraient formées dans un environnement dénué d'eau, en raison des radiations solaires destructrices. L'eau aurait alors été apportée depuis les régions externes du Système Solaire riches en glace, grâce à des météorites ou des comètes entrant en collision avec les planètes telluriques, et y apportant leur eau. Les débuts de l'Histoire du Système Solaire furent en effet très riches en impacts en tous genres, puisque le nuage originel possédait encore un grand nombre de « grumeaux » de matière virevoltant dans tous les sens...

L'eau ainsi apportée de l'extérieur se serait maintenue sur la Terre et sur Mars, puisqu'elle y serait passée à l'état liquide et aurait bénéficié de la protection de leur atmosphère. L'eau apportée sur Mercure et Vénus en revanche, restant sous forme gazeuse, aurait été détruite au fur et à mesure par les radiations solaires.

Il n'est pas impossible que les deux scénarios évoqués aient joué un rôle dans l'origine de l'eau sur la Terre. Quoi qu'il en soit, cela

met en avant un constat ironique : les régions suffisamment chaudes pour permettre l'eau liquide sont précisément les régions où la formation d'eau est difficile, du fait des rayonnements solaires nocifs... À l'inverse, les régions externes sont riches en eau, mais ne peuvent pas la faire passer aussi facilement sous forme liquide à cause des températures très faibles... Voilà pourquoi les mécanismes de transfert d'eau des régions externes vers les régions internes sont très précieux dans les perspectives d'émergence de la vie...

À quoi faut-il s'attendre sur les autres systèmes planétaires ? Les deux scénarios proposés ont bien sûr pu jouer le même rôle pour permettre l'existence d'eau à proximité de l'étoile. Mais il existe en plus un troisième scénario envisageable : la migration des planètes.

La migration des planètes

Les observations de planètes autour d'autres étoiles (« les exoplanètes »), qui se sont multipliées ces dernières années, ont en effet amené quelques constats intéressants : de nombreuses géantes gazeuses ont été détectées très près de leur étoile, à un endroit où elles ne devraient pas exister, à l'instar de la région tellurique du Système Solaire. Bien sûr, la limitation des instruments actuels tend à détecter préférentiellement des grosses planètes proches de leur étoile : il y a donc un biais observationnel évident. Mais l'existence de telles planètes n'en est pas moins intrigante.

La formation de telles planètes à l'emplacement où elles se trouvent aujourd'hui paraît impossible : l'idée est donc qu'elles se seraient formées loin de l'étoile, dans le domaine d'existence de la glace d'eau, comme dans le Système Solaire. Peut-être du fait des interactions avec le gaz et les poussières résiduelles du nuage

primitif, ces géantes gazeuses se seraient alors rapprochées peu à peu de leur étoile, jusqu'à gagner le domaine théoriquement réservé aux planètes telluriques.

Certaines de ces géantes gazeuses seraient alors en train de perdre leur gigantesque atmosphère de gaz légers, du fait des rayonnements de l'étoile. Si ce processus arrive à son terme, cela pourra conduire à des corps riches en eau (puisque formés loin de l'étoile), et dotés d'une atmosphère débarrassée du carcan de l'hydrogène et de l'hélium qui dominaient auparavant la géante gazeuse.

De tels corps hypothétiques ont un nom : ce sont des « planètes chtoniennes ». Ce scénario de migration semble idéal pour amener une grande quantité d'eau dans des régions propices à l'état liquide : beaucoup de planètes chtoniennes pourraient même être de véritables « planètes océans » démunies de continents.

Notons qu'il est encore trop tôt pour dire si le phénomène de migration des planètes est exceptionnel, ou s'il est au contraire assez commun dans la galaxie.

Définition **Planète chtonienne** : ancienne géante gazeuse ayant perdu son dihydrogène et son hélium au cours de sa migration en direction de l'étoile. Dans le cas où l'eau ne s'est pas échappée, elle peut former une fraction importante de la masse de la planète, conduisant éventuellement à la formation de « planètes océans ».

Finalement, on constate que l'eau liquide peut être présente partout dans les systèmes planétaires :

- Dans les régions externes, de nombreuses sources d'énergie peuvent pallier l'éloignement de l'étoile, et permettre le passage à l'état liquide. C'est le cas en particulier sur le satellite Europe dans le Système Solaire.
- Dans les régions internes, de nombreux mécanismes peuvent apporter l'eau malgré la difficulté à la former sur place. Ce fut

le cas en particulier sur Terre.

La migration de planètes, phénomène commun ?

Plus de 500 planètes ont été découvertes autour d'autres étoiles que le Soleil. Comme elles ne peuvent être détectées qu'indirectement, grâce aux perturbations qu'elles imposent à leur étoile, ce sont les planètes très grosses et très proches de leur étoile qui ont été repérées en premier.

De fait, parmi toutes les planètes découvertes, une seule est à coup sûr une planète tellurique : elle est tellement proche de son étoile que sa surface rocheuse pourrait être à l'état liquide du fait de la température (un océan de lave) ! Elle a probablement été formée beaucoup plus loin de l'étoile, avant de migrer jusque-là.

Quelques autres planètes ont un statut un peu hybride, intermédiaire entre les géantes gazeuses et les planètes telluriques. Ce sont peut-être des planètes chthoniennes ayant perdu leur hydrogène au cours de leur migration, mais qui auraient gardé une atmosphère assez épaisse : celle-ci pourrait notamment contenir une grande quantité d'hélium, qui s'échappe moins facilement que l'hydrogène. Elles ont conservé l'immense quantité de glace d'eau présente dans leur région de formation : cette eau ayant pu passer à l'état liquide, il pourrait s'agir de planètes océans.

Une quarantaine de planètes sont des géantes gazeuses similaires à celles du Système Solaire, assez distantes de leur étoile, et qui ne semblent donc pas avoir beaucoup migré depuis leur formation.

Toutes les autres planètes détectées (environ 90 %) sont des « Jupiter chauds », c'est-à-dire des géantes gazeuses ayant migré en direction de l'étoile mais ayant conservé leur hélium et leur hydrogène. Elles subissent sans doute une érosion plus ou moins marquée de leur atmosphère.

Il faut bien sûr être très prudent par rapport à ces statistiques balbutiantes : les techniques d'observation ont naturellement privilégié la découverte de « Jupiter chauds ». Ainsi, avec les capacités actuelles, seule Jupiter nous serait visible si nous observions notre Système Solaire depuis une autre étoile...

Pour l'instant, il est donc impossible d'avoir une vision claire de l'aspect des systèmes planétaires présents dans notre petit coin de galaxie : mais la moisson de planètes s'annonce extrêmement prolifique au vu des premiers résultats...

L'eau liquide sur le long terme

Pour le développement de la vie, la présence d'eau liquide à un endroit et à un instant donnés ne suffit pas : il faut que cette situation se maintienne sur des échelles de temps de l'ordre du milliard d'années. Or les environnements planétaires sont souvent changeants, ce qui peut rendre plus fragile cette stabilité de l'eau liquide. La planète Mars en fournit un bel exemple : elle se trouve dans une région du Système Solaire favorable à l'existence de l'eau liquide, et de fait l'eau liquide était bien présente à sa surface au début de son histoire. Mais elle a rapidement disparu : quelle est l'origine de ce changement irréversible ?

Un seul facteur explique à lui seul la divergence entre l'histoire de Mars et celle de la Terre : Mars est plus petite.

Cela entraîne de nombreuses conséquences : d'abord, cela diminue la quantité de gaz pouvant se dégager dans l'atmosphère, ce qui réduit la pression par rapport à une planète plus grosse. L'effet de serre dû à certains gaz (notamment le dioxyde de carbone) s'en trouve réduit, et la température est donc plus faible par rapport à une grosse planète. Dans le cas de Mars, cet effet s'ajoute à son plus grand éloignement du Soleil par rapport à la Terre : Mars a sans doute toujours été sensiblement plus froide.

D'autre part, une petite planète perd beaucoup plus rapidement son énergie interne, car son rapport surface/volume est plus élevé. Du fait de l'énergie due à la contraction et à la décomposition d'éléments radioactifs, les noyaux de la Terre et de Mars (composés de fer et de nickel principalement) étaient suffisamment chauds pour être liquides au début de leur Histoire. Mais le noyau de Mars s'est refroidi beaucoup plus vite, jusqu'à se solidifier, tandis que le noyau externe de la Terre est resté liquide jusqu'à aujourd'hui.

Cette solidification a réduit l'intensité de l'activité volcanique

martienne. Or celle-ci est responsable du dégagement de gaz à effet de serre dans l'air : la température a donc encore diminué de ce fait.

Par ailleurs, cette solidification a provoqué la disparition du champ magnétique martien. Le champ magnétique d'une planète est en effet dû à la rotation d'un noyau liquide et conducteur et il a comme principal avantage de dévier les particules chargées venues du Soleil, qui cassent les molécules d'eau et bien d'autres. La disparition du champ magnétique martien, assez tôt dans son Histoire, a donc ôté ce bouclier qui protégeait la planète.

Finalement, « l'érosion » de l'atmosphère martienne s'est accélérée. Tandis que la quantité de dioxyde de carbone dégagée diminuait, le diazote de l'atmosphère était « cassé » par les radiations solaires et éjecté dans l'Espace. Cet échappement a été d'autant plus rapide que la gravitation était faible, du fait là encore de la faible masse de Mars...

La pression est ainsi descendue près de la barre fatidique des 6 mbar, et l'eau liquide a commencé à passer sous forme gazeuse. Elle a alors à son tour subi l'érosion due aux radiations solaires : brisée en atomes d'oxygène et d'hydrogène, il ne lui restait plus aucune chance de se maintenir sur la planète. En particulier, l'hydrogène étant le plus léger de tous les atomes, il est le premier à quitter l'attraction de la planète et à s'enfuir de façon définitive...

Seules les molécules d'eau à l'abri dans le sous-sol ont été protégées des radiations solaires : c'est là qu'on peut trouver de l'eau encore aujourd'hui, sous forme de glace. L'eau étant une espèce légère, elle ne s'étend probablement pas sur de très grandes profondeurs : elle tend toujours à surnager au-dessus des corps rocheux des planètes. La quantité de glace d'eau qui demeure sur Mars aujourd'hui est donc sans doute bien faible, au regard de ce qu'elle pouvait être au début de son Histoire...

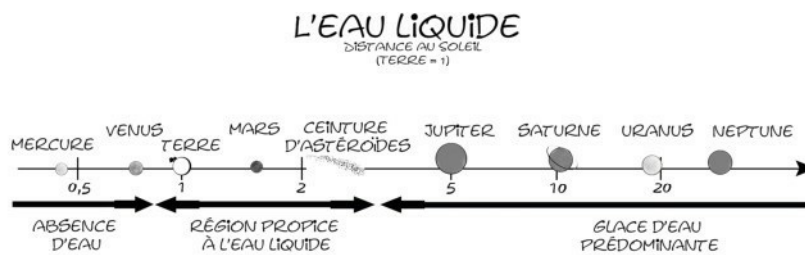
Ainsi, l'éloignement de Mars joue peu de rôle dans cette triste évolution des choses : si la Terre avait été aussi petite que Mars, elle aurait sans doute connu le même sort (les radiations solaires y sont même plus fortes que sur Mars). Et si Mars avait été aussi grosse que la Terre, elle aurait probablement conservé son eau liquide, à l'abri sous une épaisse couche d'atmosphère. En soi, la position de Mars par rapport au Soleil est tout aussi favorable au maintien de l'eau liquide que la position de la Terre.

Il en va autrement de Vénus : si celle-ci avait été plus grosse, cela n'aurait fait qu'amplifier l'effet de serre, élevant encore davantage la température et interdisant ainsi la présence d'eau liquide. Si elle avait été plus petite, les radiations solaires très intenses à cet endroit auraient rogné son atmosphère de façon plus efficace encore que sur Mars, et elle serait devenue un corps rocheux mis à nu à l'instar de Mercure.

Ainsi, il existe bien une limite de distance à l'étoile en dessous de laquelle la présence d'eau liquide est impossible : dans le Système Solaire, elle intervient entre les orbites de Vénus et de la Terre. En revanche au-delà, tout est possible... Jusqu'à la ceinture d'astéroïdes, la présence d'eau liquide est possible à condition que la planète soit assez grosse. Au-delà, l'eau liquide est possible à condition que d'autres sources d'énergie remplacent le Soleil (par exemple liées au phénomène de marée). Elle est même possible en surface à condition que le corps soit assez gros pour conserver une atmosphère suffisamment épaisse (comme celle de Titan par exemple).

L'eau liquide, une substance abondante

Nous avons représenté ci-dessous la position des planètes du Système Solaire en fonction de leur distance au Soleil. La région où une planète assez grosse peut contenir de l'eau liquide y est mise en évidence : le domaine apparaît assez vaste, de la Terre à la ceinture d'astéroïdes.



Précisons qu'au-delà de la ceinture d'astéroïdes, l'eau liquide n'est pas absente pour autant, comme le montre l'exemple du satellite Europe. Mais une source d'énergie locale doit alors s'ajouter à celle du Soleil. Ce sont les forces de marée qui jouent ce rôle sur Europe.

Le Système Solaire est-il exceptionnellement pauvre en eau liquide ?

Les raisonnements précédents tendent à indiquer que l'eau liquide peut être présente en de nombreuses régions d'un système planétaire. Nous allons maintenant présenter un mécanisme particulièrement vertueux, propice à l'eau liquide, qui amplifiera encore cette impression.

Partons d'un constat simple : Vénus et la Terre sont de même taille, et se trouvent dans une région voisine au sein du Système Solaire. Or Vénus possède 90 bars de dioxyde de carbone dans son atmosphère, ce qui est considérable et explique l'effet de serre intense de cette planète (la température s'y élève à 460 °C). Une question s'impose alors : comme la Terre est très semblable à Vénus, elle aurait dû rejeter autant de dioxyde de carbone dans son atmosphère, et devenir également une fournaise ! Où est donc passé le dioxyde de carbone terrestre ?

C'est l'existence de l'eau liquide qui fournit l'explication : au fur et à mesure que les volcans rejetaient du dioxyde de carbone, celui-ci a été dissous dans les océans. Il a alors pu réagir avec d'autres

espèces pour former des carbonates, qui se sont déposés sur les fonds marins (n'oublions pas que favoriser les réactions chimiques est précisément la grande propriété de l'eau liquide). Ce dépôt de carbonates a « libéré de la place » dans l'eau pour pouvoir dissoudre davantage de dioxyde de carbone, et ainsi de suite : l'équivalent des 90 bars de dioxyde de carbone vénusiens est ainsi passé presque intégralement sous forme de carbonates sur Terre. Cela a limité l'effet de serre, permettant à l'eau liquide de subsister : finalement, c'est l'eau liquide qui a permis de maintenir des conditions favorables à l'eau liquide... Sur Vénus, l'eau liquide n'a jamais pu apparaître, et ce mécanisme n'a donc jamais pu s'enclencher.

Ce processus permet donc de maintenir une température suffisamment faible pour que l'eau liquide ne passe pas à l'état gazeux. Mais il garantit aussi de maintenir la température au-dessus de 0 °C, grâce à une boucle de rétroaction remarquable.

En effet, supposons que la température passe en dessous de 0 °C : l'eau gèle, et ne peut donc plus dissoudre le dioxyde de carbone. Or, sur Terre, celui-ci continue d'être dégagé par les volcans : il commence donc à s'accumuler dans l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre et donc la température. Cette augmentation prend fin lorsque l'eau repasse à l'état liquide : le dioxyde de carbone est à nouveau dissous, et la température peut se stabiliser.

En pratique, il existe donc un équilibre naturel entre la taille des calottes de glace et la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère, garantissant à l'eau de rester en partie liquide. Si les calottes sont très développées, il reste moins d'eau liquide pour dissoudre le dioxyde de carbone, ce qui augmente la température et réduit la taille des calottes. Si les calottes sont inexistantes, davantage de dioxyde de carbone est dissous et la température diminue, ce qui les fait renaître^[1].

De fait, la Terre a connu des phases très froides de « boule de neige » dans le passé, où elle était presque entièrement couverte de glace. Le mécanisme que nous avons décrit a sans doute joué un rôle important pour lui permettre de se sortir toute seule de ces phases sans doute critiques pour la Vie...

Notons que ce cercle vertueux cesse dès que les calottes polaires disparaissent totalement. L'éjection du dioxyde de carbone peut alors augmenter la température de la planète jusqu'à ce que l'eau s'évapore. Or la Terre se trouve précisément à cette charnière aujourd'hui : les calottes polaires y sont réduites à la portion congrue à cause de la production massive de dioxyde de carbone par l'Homme. Ce gaz s'accumule rapidement dans l'atmosphère sans mécanisme régulateur, et la température va continuer d'augmenter de façon inquiétante dans les prochaines décennies...

Ce mécanisme est tout aussi utile sur les planètes plus éloignées du Soleil, telles que Mars. Si Mars avait été de la même taille que la Terre, elle aurait eu potentiellement à sa disposition 90 bars de dioxyde de carbone... C'est largement suffisant pour maintenir une température supérieure à 0 °C, même à la distance où elle se trouve ! Comme sur Terre, une partie aurait été dissoute dans les océans, et un équilibre naturel serait apparu entre la taille des calottes de glace et la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Cela signifie qu'à taille égale, plus une planète est éloignée de son étoile, plus elle tend à avoir une atmosphère épaisse de dioxyde de carbone, maintenant la température au-dessus de 0 °C à l'équateur. Grâce à l'effet de serre, un plus grand éloignement à l'étoile ne provoque donc pas de diminution importante de la température ; en revanche, l'épaisseur de l'atmosphère et l'effet de serre associés augmentent fortement, de même que la taille des calottes polaires.

L'effet de serre

Une serre aux parois en verre placée en plein soleil tend à chauffer fortement. En effet, l'énergie contenue dans la lumière visible du soleil peut traverser le verre et être absorbée par les objets à l'intérieur, ce qui les chauffe.

En l'absence de serre, ce processus de chauffage serait compensé par le fait que tout objet émet des infrarouges, d'autant plus qu'il est chaud : il y aurait donc un équilibre naturel entre l'énergie visible absorbée, et l'énergie infrarouge perdue. Mais il se trouve que le verre absorbe les infrarouges, ce qui rompt cet équilibre : la lumière visible du soleil continue à chauffer les objets, tandis que le processus de refroidissement par infrarouges est bloqué. C'est ce qui conduit à l'augmentation de température à l'intérieur de la serre.



L'atmosphère terrestre joue un rôle similaire à celui des parois en verre de la serre. De tous ses constituants, le dioxyde de carbone est le plus à même d'arrêter les infrarouges envoyés par la Terre vers l'Espace, mais ce n'est pas le seul. Le méthane, par exemple, joue un rôle similaire.

Les conséquences sur la température sont considérables : ainsi, les températures moyennes à la surface de Mercure, de Vénus et de la Terre sont respectivement de 169 °C, 462 °C et 15 °C. En l'absence d'effet de serre, la température de Vénus devrait être comprise entre celle de Mercure et de la Terre, puisqu'elle est située entre les deux : l'effet de serre contribue donc à y augmenter la température de plus de 350 °C !

Ce constat est très encourageant, car cela signifie qu'on doit pouvoir trouver de l'eau liquide même à grande distance d'une étoile, grâce à l'effet de serre.

Pour cela, encore faut-il que les volcans éjectent régulièrement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère : or comme nous l'avons vu, la faible taille de Mars a conduit son noyau à se refroidir

rapidement, réduisant considérablement le volcanisme. Tandis que les radiations solaires éjectaient le diazote dans l'Espace, la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau n'était plus compensée par son éjection des volcans : la diminution de dioxyde de carbone atmosphérique s'est donc poursuivie, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau liquide à la surface de Mars pour le dissoudre, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression descende à 6 mbar (c'est la pression limite d'existence de l'eau liquide).

Or la pression actuelle, principalement due au dioxyde de carbone, est précisément de 6 mbar : cela correspond à cette limite d'existence de l'eau liquide, ce qui n'est certainement pas un hasard ! Le scénario précédent permet d'en fournir une belle explication.

Finalement, la faible taille de Mars a empêché les mécanismes régulateurs de l'eau liquide de fonctionner : comme nous l'avons déjà souligné, la taille de Mars explique à elle seule les divergences avec la Terre, et non son plus grand éloignement au Soleil.

Au vu de la réserve exceptionnelle de dioxyde de carbone présente dans une planète de la taille de la Terre, on peut ainsi espérer trouver de l'eau liquide même sur des planètes telluriques très loin de leur étoile, grâce à l'effet de serre. Dans le Système Solaire, cela signifie qu'il aurait peut-être pu y avoir de l'eau liquide au niveau de la ceinture d'astéroïdes, si une planète suffisamment grosse s'y était formée.

L'absence de planète à cet endroit est due à la masse considérable de Jupiter, qui « navigue » un peu plus loin : les perturbations gravitationnelles de la géante gazeuse ont empêché les roches de s'agglomérer, ce qui explique qu'elles soient restées de simples astéroïdes. Ainsi, si Jupiter avait été plus petite, une planète tellurique supplémentaire habiterait probablement le Système

Solaire ; et à condition qu'elle soit assez grosse, cette planète serait peut-être en mesure de posséder de l'eau liquide...

Finalement, on voit que le Système Solaire n'a pas eu spécialement de « chance » vis-à-vis de la présence d'eau liquide : une seule planète tellurique en possède, alors qu'il aurait pu y en avoir trois. Et aucun corps externe n'en possède en surface malgré les réelles possibilités (Titan en aurait peut-être eu localement s'il avait bénéficié des mêmes effets de marée que Io...). Ces considérations sont particulièrement encourageantes dans la perspective de trouver de la vie autour d'autres étoiles...

La ceinture d'astéroïdes

La ceinture d'astéroïdes est composée d'une myriade de petits corps qui n'ont pas pu s'agglomérer en raison des perturbations gravitationnelles de Jupiter : environ vingt mille sont recensés à ce jour. Plusieurs centaines ont un diamètre supérieur à 100 km, et le plus gros astéroïde, Cérès, atteint presque les 1 000 km.

Pourtant, la masse totale de tous ces astéroïdes ne dépasse pas 4 % de la masse de la Lune... Ainsi, même si toute cette matière était agglomérée en un seul corps, cela ne formerait pas pour autant une planète digne de ce nom. La présence de Jupiter en fournit là encore l'explication : son attraction gravitationnelle a accaparé toute la matière présente à l'origine dans le voisinage.

De même, la faible masse de Mars est peut-être due elle aussi à la présence de Jupiter, pourtant assez lointaine. Finalement, si Jupiter avait été plus petite, il existerait peut-être quatre planètes de masse terrestre dans le Système Solaire (Vénus, la Terre, Mars et Cérès). Et trois d'entre elles pourraient alors posséder de l'eau liquide en surface grâce à l'effet de serre : à partir de là, il ne semble pas absurde de s'imaginer que trois civilisations distinctes puissent habiter dans le même système planétaire, en de nombreux endroits de notre galaxie...

Mais ne soyons pas trop durs envers Jupiter : elle a aussi servi de « tremplin » en propulsant certains corps glacés des régions extérieures en direction de la Terre. En s'écrasant à la surface, ils y ont apporté leur eau : ainsi, notre planète serait peut-être bien moins riche en eau sans l'influence de la géante gazeuse...

L'énergie lumineuse des étoiles

La chimie intense nécessaire pour réaliser des organismes complexes nécessite la présence d'eau liquide afin de mettre les molécules au contact les unes avec les autres le plus efficacement possible. Mais ces réactions chimiques ont besoin d'énergie pour pouvoir se produire. La présence d'une source d'énergie est donc une condition indispensable pour le développement de la vie, au moins autant que la présence d'eau liquide.

Sur Terre, c'est la lumière du Soleil qui est la principale source primaire d'énergie pour la vie. Dès les débuts de l'Histoire de la vie, les cyanobactéries ont commencé à utiliser cette lumière pour réaliser les réactions chimiques nécessaires à leur reproduction, initiant ainsi la « photosynthèse ».

Aujourd'hui, la quasi-totalité du vivant trouve sa source énergétique dans la lumière du Soleil. Par exemple, les animaux herbivores, qui n'utilisent pas directement cette énergie lumineuse, se nourrissent de végétaux ; or l'énergie contenue dans ces végétaux est issue de la photosynthèse. De même les carnivores trouvent leur énergie dans les herbivores.

L'Homme puise quotidiennement son énergie dans celle du Soleil, mais de façon indirecte. C'est le cas lorsqu'il mange : comme nous venons de le voir, l'énergie contenue dans la nourriture provient initialement du Soleil. De même le pétrole et le charbon sont issus de la décomposition de matière organique, principalement issue de végétaux : leur énergie provient donc du Soleil à l'époque où ces végétaux étaient encore vivants. En quelque sorte, ces végétaux ont permis de « stocker » une part de l'énergie solaire pendant plusieurs millions d'années, jusqu'à ce que l'Homme la réutilise.

De même, les vents sont dus aux différences de pression atmosphérique, elles-mêmes liées aux différences de

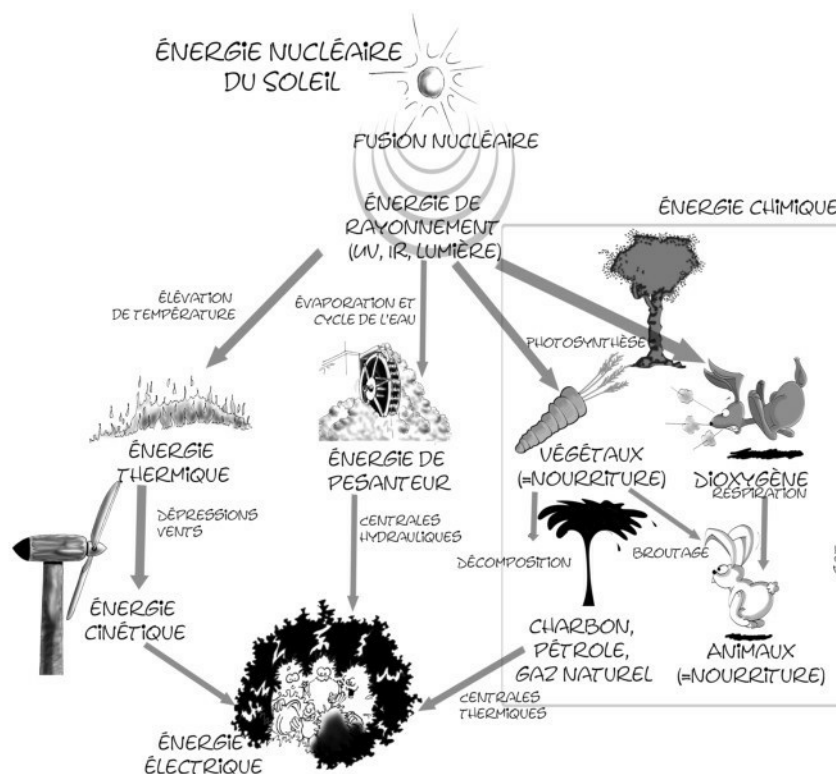
température : ainsi l'énergie du vent, notamment utilisée dans les éoliennes, provient elle aussi du Soleil. Il en va de même de l'énergie hydraulique : c'est le Soleil qui permet à l'eau des océans de s'évaporer, avant de retomber en pluie et de former les lacs et les rivières.

Ces exemples mettent en avant le caractère exceptionnel de l'énergie solaire, et il est logique que la vie sur Terre se soit servie en priorité de cette source d'énergie pour se développer. La proximité d'une planète à son étoile semble donc être un atout fort pour le développement de la vie à sa surface.

Pour cette raison, l'émergence de la vie sur Mars aux débuts de son Histoire paraît plus délicate que sur Terre, même si ces deux planètes possédaient de l'eau liquide à cette époque. En effet, Mars étant plus loin du Soleil, elle a bénéficié d'une énergie plus faible, ce qui a pu freiner voire empêcher le développement de la vie. Ce phénomène a été amplifié par la faible taille de Mars : l'effet de serre a toujours été plus faible que sur Terre, et une plus grande part de l'énergie du Soleil était réexpédiée dans l'Espace sous forme de rayonnements.

L'énergie nucléaire du Soleil, source ultime

Nous avons représenté ci-dessous les différentes formes d'énergie présentes sur Terre qui sont issues de celle du Soleil. En particulier, l'énergie solaire est la source de toute vie à la surface de la Terre, par le biais de sa conversion en énergie chimique. La majeure partie de l'énergie électrique développée dans les centrales, qu'elles soient thermiques, hydrauliques, solaires, ou des éoliennes, vient également du Soleil.



Finalement, c'est surtout à ce niveau qu'apparaît le caractère exceptionnel de la Terre. Nous avons vu que l'eau liquide pouvait se trouver en de nombreux endroits dans un système planétaire ; mais plus la planète est loin de son étoile, plus le développement de la vie y est difficile. Or parmi tous les corps capables de détenir de l'eau liquide dans le Système Solaire, la Terre est le plus proche du Soleil.

Le domaine d'émergence de la vie autour d'une autre étoile s'en trouve subitement réduit : pas trop proche de l'étoile pour autoriser la présence d'eau liquide, mais pas trop loin pour que l'énergie soit suffisante au développement du vivant. Il est bien sûr impossible de préciser la gamme de distances à l'étoile permettant à la vie d'émerger. Il suffit de constater que dans le Système Solaire, la Terre est quasiment au plus près du Soleil qu'il est possible d'espérer (Vénus montre qu'une plus grande proximité aurait détruit l'eau liquide).

L'énergie gravitationnelle

L'énergie contenue dans la nourriture, dans du pétrole ou dans du charbon est issue de l'énergie solaire, l'énergie reine sur Terre. Mais il existe d'autres sources primaires d'énergie possibles, qui pourraient même se substituer à celle du Soleil sur d'autres planètes. La première d'entre elles est l'énergie gravitationnelle : lorsqu'un système planétaire se forme, des « grumeaux » de matière s'effondrent sur eux-mêmes du fait de la force gravitationnelle jusqu'à former des planètes. L'accélération liée à cet effondrement crée de l'énergie, qui conduit à chauffer l'intérieur de la planète. Comme nous l'avons vu, une partie de l'énergie de Jupiter provient de ce phénomène de contraction qui se poursuit aujourd'hui, et qui est responsable de l'augmentation de température lorsqu'on s'enfonce dans la planète. En revanche sur Terre, cette énergie due à la contraction est négligeable depuis bien longtemps : seul un corps de la taille d'une géante gazeuse peut développer une telle énergie sur une échelle de plusieurs milliards d'années.

Dans le cas d'un satellite situé à proximité d'une énorme géante gazeuse, cette énergie due à la contraction de la planète pourrait s'ajouter à celle de l'étoile, et favoriser ainsi le développement de la vie en surface. Nous avons aussi évoqué l'existence de « naines brunes », qui sont des corps énormes mais néanmoins trop petits pour déclencher des réactions nucléaires et émettre de la lumière. Un satellite suffisamment proche pourrait bénéficier de l'énergie due à la contraction gravitationnelle de la naine brune, émise sous forme de rayonnement infrarouge.

Cet apport d'énergie possède toutefois ses limites : en effet, nous avons vu que plus un satellite était proche de sa planète, plus il était écartelé par les forces de marée. En dessous d'une certaine distance appelée « limite de Roche », le satellite explose

littéralement et ne peut donc pas exister. Ainsi, autour d'une naine brune, un corps ne peut exister qu'au-delà d'une certaine « distance de sécurité » : à cette distance, l'énergie de la naine brune reste nécessairement très faible, plus faible que l'énergie lumineuse du Soleil au niveau de la Terre. Il est donc peu probable que l'énergie due à la contraction gravitationnelle puisse être la principale source d'énergie pour la vie, où que ce soit dans la galaxie...

Les naines brunes

Les naines brunes se forment de façon similaire aux étoiles, mais leur masse est restée trop faible pour que les réactions de fusion de l'hydrogène aient pu se déclencher. Elles ne dépassent pas 7 % de la masse solaire : au-delà, elles deviendraient de véritables étoiles. À l'inverse, leur masse minimale est estimée à 13 fois la masse de Jupiter : en dessous, elles seraient considérées comme des planètes. Une naine brune est capable de fusionner son deutérium, contrairement à une planète.

L'énergie libérée par une naine brune est principalement due à sa contraction gravitationnelle : elle faiblit à mesure que l'âge de la naine brune augmente. Cette énergie est émise sous forme de rayonnements infrarouges.

Les naines brunes n'émettant pas de lumière visible, elles sont très difficiles à détecter : la première a été découverte il y a une quinzaine d'années seulement.

Malgré cela, des planètes ont déjà été repérées autour de certaines naines brunes ! La moisson promet d'être abondante...

Ce sont plutôt les forces de marée qui sont capables de déployer efficacement l'énergie gravitationnelle. L'exemple de Io et de son volcanisme débridé montre que cette énergie peut être considérable, jusqu'à élever la température à plusieurs milliers de degrés. Cette énergie pourrait donc être suffisante pour autoriser le développement de la vie. Elle requiert là encore la proximité d'une géante gazeuse ou d'une naine brune, ainsi qu'une orbite qui ne soit pas parfaitement circulaire pour permettre un « malaxage »

efficace. Ce type de phénomène pourrait être assez commun dans les systèmes planétaires, ce qui est plutôt encourageant dans la perspective de trouver des formes de vie extraterrestres.

La radioactivité

La troisième source primaire d'énergie envisageable est la désintégration radioactive des éléments lourds présents au cœur des planètes. Cette source est d'une grande importance sur Terre : c'est elle qui explique que la température augmente avec la profondeur, tant et si bien que le noyau externe de notre planète est liquide. C'est notamment l'énergie à l'origine du volcanisme et des séismes. Elle est utilisée dans les centrales nucléaires, qui utilisent l'uranium radioactif extrait de l'écorce terrestre. L'énergie interne de la Terre peut également être exploitée par le biais de la géothermie.

Cette énergie issue de la radioactivité à l'intérieur de la planète peut-elle être suffisante pour autoriser le développement de la vie ? La réponse est oui, et nous en avons cette fois des preuves sur Terre. En 1979, des organismes vivants ont été découverts à proximité des dorsales situées au milieu des océans, d'où les plaques tectoniques s'écartent les unes des autres. Ces organismes bénéficient de l'énergie et de la matière libérée par des geysers sous-marins, connus sous le nom de « fumeurs noirs ». Contrairement à la vie de la surface, ils ne dépendent en aucune manière du rayonnement du soleil, qui n'atteint pas de telles profondeurs : il s'agit d'un écosystème clos, sans lien avec l'écosystème basé sur la photosynthèse.

Cette découverte a ouvert de nouveaux espoirs quant au développement de la vie sur d'autres planètes : elle montre que la vie n'a pas nécessairement besoin de la lumière d'une étoile pour exister. Elle ouvre même des perspectives au sein même du

système solaire : ainsi le satellite Europe possède un océan d'eau liquide sous une fine croûte glacée, qui est sans doute chauffé par des volcans sous-marins. Dans ce cas, l'énergie provient des forces de marée et non de la radioactivité, mais le résultat est probablement similaire : la vie existant au fond des océans sur Terre, elle pourrait de même exister au fond des océans sur Europe.

Ces espoirs doivent être toutefois largement tempérés : de toute évidence, la vie sur Terre s'est construite près de la surface pour bénéficier de l'énergie du Soleil. Ce n'est qu'ensuite, une fois déjà bien développée à l'échelle de la cellule, qu'elle a conquis de nouveaux milieux tels que les dorsales océaniques. La capacité de la vie à s'adapter à des milieux dénués de lumière est une chose ; sa capacité à y émerger à partir d'un milieu totalement inerte en est une autre. On peut douter que la vie ait pu apparaître d'elle-même au fond des océans, car l'énergie fournie par les geysers sous-marins reste bien inférieure à celle du Soleil en surface.

Il en va sans doute de même sur Europe : certes les conditions sous sa surface correspondent peut-être à l'environnement des dorsales terrestres. Mais faute d'énergie solaire, les possibilités d'émergence de la vie paraissent bien plus réduites que sur Terre, la couche de glace empêchant la lumière du Soleil de pénétrer à l'intérieur de l'océan.

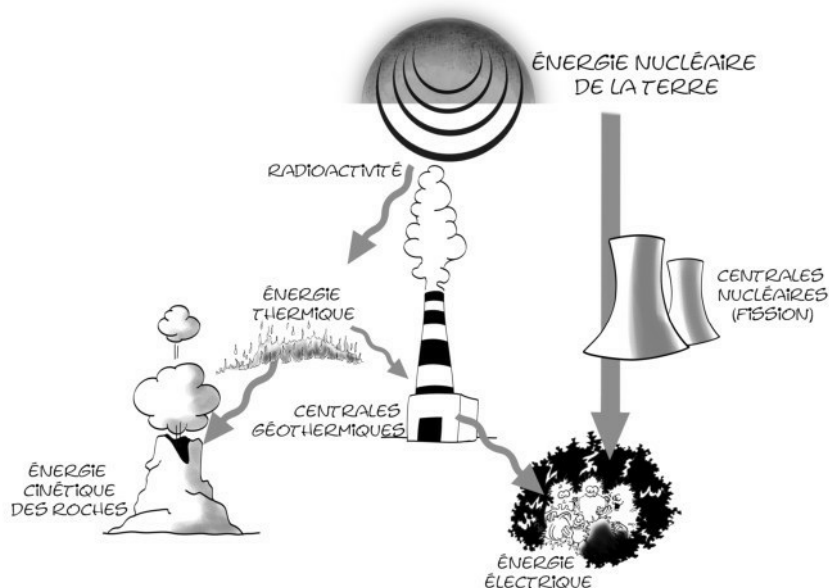
De façon plus générale, nous pouvons d'ailleurs dresser un constat très fort : la majeure partie de l'énergie déployée dans l'Univers l'est par les étoiles, issue des réactions de fusion nucléaire et émise sous forme de rayonnements. L'énergie gravitationnelle et radioactive présente dans les naines brunes et les planètes fait pâle figure à côté. Or la vie sur Terre a utilisé prioritairement l'énergie du Soleil pour se développer, ce qui n'est pas un hasard. On peut toujours imaginer une forme de vie extraterrestre qui se serait développée grâce à l'énergie

gravitationnelle ou à celle due à la radioactivité ; mais dans ce cas, cette forme de vie n'aura certes pas utilisé la forme d'énergie la plus abondante disponible dans l'Univers...

Finalement, les choix que la vie a adoptés sur Terre pour se développer continuent de paraître assez « logiques », au regard des données intangibles de l'Univers. Choix des éléments H, C, N et O comme « briques fondamentales », qui sont les quatre éléments les plus abondants susceptibles de former des molécules. Choix de l'eau liquide H_2O comme environnement, de loin le solvant propice à la chimie le plus facile à former, au vu de l'abondance des éléments. Et enfin choix du rayonnement de l'étoile comme source principale d'énergie, celui-ci étant de loin la principale énergie déployée dans les systèmes planétaires.

La radioactivité, source primaire mineure

Les conséquences de l'énergie interne de la Terre sont représentées ci-dessous. Ce diagramme est à comparer avec celui de l'énergie solaire : l'énergie de la Terre apparaît bien plus limitée.



Précisons enfin que l'énergie due à la radioactivité n'est pas

constante au cours du temps : elle décroît peu à peu à mesure que l'âge de la planète augmente, car les éléments radioactifs se désintègrent inéluctablement un à un. Ainsi, la Terre était-elle beaucoup plus active à ses débuts, avec un volcanisme plus intense. Par ailleurs, elle ne joue un rôle que sur les planètes assez grosses, comme Vénus et la Terre : les planètes plus petites possèdent un rapport plus élevé entre leur surface et leur volume, et tendent donc à perdre plus rapidement cette énergie radioactive en l'évacuant vers l'Espace. C'est le cas notamment sur Mars, comme nous l'avons vu : l'énergie radioactive chauffait son cœur au début de son Histoire, alimentant son champ magnétique et autorisant un volcanisme très actif. Puis, la radioactivité diminuant peu à peu, l'énergie n'a pas été suffisante pour maintenir un noyau liquide : le champ magnétique a disparu, et le volcanisme a fortement faibli.

Finalement, si l'énergie due à la radioactivité reste importante sur Terre, le cas reste assez isolé : en dehors de Vénus, aucun autre corps du système solaire ne peut déployer beaucoup d'énergie par ce biais. Sur d'autres systèmes planétaires en revanche, on peut imaginer des planètes telluriques encore plus grosses que la Terre, qui déploieraient donc une énergie radioactive encore plus intense...

D'où viennent les éléments radioactifs ?

Un élément radioactif est caractérisé par sa « demi-vie », qui représente le temps au bout duquel la moitié des atomes en présence se sont désintégrés. L'élément radioactif le plus abondant sur Terre est l'uranium 238, de demi-vie 4,5 milliards d'années (notons au passage que l'élément utilisé dans les centrales nucléaires est l'uranium 235, de durée de vie beaucoup plus courte, mais nettement moins abondant). Or 4,5 milliards d'années, c'est à peu de choses près l'âge de la Terre, ce qui n'est pas un hasard ! Tous les éléments plus radioactifs que l'uranium ont eu le temps de se désintégrer depuis la naissance de la Terre, et n'existent donc plus que sous forme de traces aujourd'hui.

Cela indique que la Terre est incapable de renouveler ses éléments radioactifs, et « s'éteint » peu à peu. Dans ce cas, où l'uranium et ses congénères ont-ils bien pu être formés ? La réponse réside là encore dans les étoiles.

En fin de vie, nous avons vu que les étoiles les plus massives créaient des éléments lourds jusqu'au fer : ces réactions de fusion nucléaire dégagent de l'énergie, et tendent donc à créer un « emballement » dans l'étoile, en la chauffant toujours plus. L'étoile se met alors à grossir jusqu'à former une « Géante Rouge ».

À partir d'une certaine pression et température, même des éléments plus lourds que le fer peuvent être formés, notamment les éléments radioactifs. Mais ces réactions de fusion consomment énormément d'énergie au lieu d'en produire : c'est la phase finale de l'étoile, qui va aboutir à son extinction. Faute de chauffage, les régions internes de l'étoile se contractent soudain à grande vitesse. L'énergie colossale due à cette contraction crée une onde de choc brutale, qui « souffle » les régions plus externes de l'étoile : c'est l'explosion en supernova. Cette explosion permet de disperser les éléments créés : ceux qui sont stables tels que le fer, mais aussi ceux qui sont radioactifs tels que l'uranium.

Contrairement aux autres, les éléments radioactifs de courte durée de vie ne s'accumulent pas dans la galaxie puisqu'ils s'autodétruisent. Cependant, certains comme l'uranium ont le temps de se mélanger aux poussières interstellaires et de participer à leur effondrement en systèmes planétaires. Ils achèvent alors leur décomposition à l'intérieur des planètes, ce qui leur confère leur énergie interne et les rend « vivantes ».

Finalement, l'énergie d'une planète dépend beaucoup de l'endroit où elle s'est formée : si plusieurs supernovæ ont explosé non loin de là peu avant sa formation, alors cela doit conduire à un système planétaire « plein d'énergie », très riche en éléments radioactifs. À l'inverse, d'autres systèmes sont sans doute beaucoup plus pauvres en éléments radioactifs, et sont alors constitués de « planètes mortes ».

Le dioxygène, une source secondaire exceptionnelle

Si l'énergie du Soleil est la principale source primaire d'énergie, il existe de nombreuses sources secondaires issues de celle de notre étoile : nous avons vu l'exemple de la nourriture, du charbon ou

du pétrole, entre autres. Dans ces exemples, les végétaux ont capté l'énergie solaire et l'ont emmagasinée sous forme « chimique » : cette énergie se retrouve dans le charbon que nous brûlons ou dans la nourriture que nous mangeons.

On parle d'énergie chimique car ce sont des réactions chimiques qui permettent de déployer l'énergie emmagasinée. Dans le cas de l'Homme, les réactions chimiques issues de la nourriture ingérée permettent notamment de maintenir le corps à 37 °C (de même que le fait de brûler du charbon chauffe une pièce).

C'est ce maintien d'une température élevée qui permet ensuite à d'autres réactions chimiques de s'amorcer, permettant au corps de se développer. Finalement dans notre exemple, l'énergie thermique du corps nécessaire aux réactions chimiques est fournie par d'autres réactions chimiques...

Parmi toutes les espèces chimiques qui contiennent ainsi de l'énergie, le dioxygène est un cas tout à fait intéressant. Comme nous l'avons vu, c'est un excellent « oxydant », le meilleur parmi les espèces simples, ce qui signifie qu'il tend à réagir de façon intense avec beaucoup d'autres espèces : il renferme une énergie chimique importante.

Cela explique que l'accumulation de dioxygène dans l'atmosphère, il y a plus de 2 milliards d'années, ait été une révolution pour la vie : elle a offert une nouvelle source d'énergie. L'intérieur de la cellule a pu alors atteindre une complexité considérable.

Une question s'impose toutefois : le dioxygène a été produit par les premières bactéries à partir de la photosynthèse. Il s'agit donc d'une source secondaire d'énergie, issue de l'énergie primaire qu'est le rayonnement du Soleil. Il s'ensuit que l'énergie contenue dans le dioxygène créé ne peut pas être supérieure à celle contenue dans le rayonnement solaire initial : en aucun cas l'énergie ne se crée.

Dans ce cas, pourquoi le dioxygène a-t-il été si important pour la vie, alors qu'il lui suffisait d'utiliser directement l'énergie solaire pour se développer ? Quelle est la valeur ajoutée du dioxygène, s'il contient moins d'énergie que le rayonnement solaire ?

Une première explication réside dans la manière de capter cette énergie. Pour capter le rayonnement solaire, il faut une grande surface déployée au grand jour. Pour capter le dioxygène en revanche, cette surface peut être repliée à l'ombre d'une cellule (mitochondrie) ou de n'importe quel organisme (poumon). La cellule étant précisément basée sur la délimitation d'un volume fermé où règne « l'ordre », on comprend que cette deuxième façon de capter de l'énergie ait pu offrir de précieuses opportunités dans l'édification de nouvelles structures.

Une deuxième explication, peut-être encore plus essentielle, réside dans la stabilité de cette nouvelle source d'énergie. Pour les cellules, l'énergie solaire n'est disponible que la moitié du temps, pendant le jour. Pendant la nuit, elles doivent se mettre « en veilleuse ». De plus, le rayonnement varie en fonction de la saison, ou bien encore en fonction de la présence de nuages. Tandis que le dioxygène est disponible en quantité constante 24 heures sur 24, 365 jours par an... Cette disponibilité permanente du dioxygène est son grand atout par rapport à la lumière du Soleil : c'est peut-être elle qui a autorisé une nouvelle explosion dans le développement de la vie.

Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le comportement des végétaux aujourd'hui : ils utilisent la lumière du Soleil par photosynthèse le jour, mais respirent le dioxygène la nuit comme les animaux. Autrement dit, les végétaux comme les animaux ont besoin d'une source permanente d'énergie, et seul le dioxygène est capable de jouer ce rôle. Aux débuts de l'Histoire de la vie, le dioxygène n'était pas disponible : les premières bactéries étaient obligées d'utiliser des sources d'énergie chimique moins riches

que le dioxygène pendant la nuit. C'est sans doute ce qui a limité leur développement pendant les deux premiers milliards d'années.

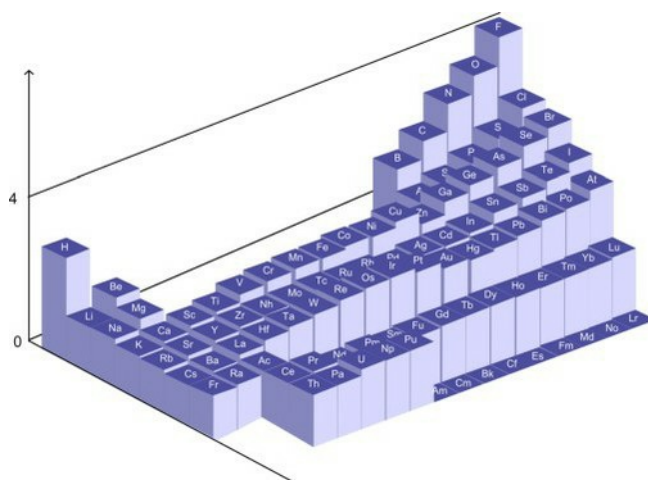
Le dioxygène, un excellent oxydant

Nous avons reporté ci-contre la table des éléments : la hauteur d'une colonne représente la capacité de l'atome à attirer des électrons. Les éléments en bas à gauche du tableau tendent à perdre des électrons (petites colonnes), tandis que ceux en haut à droite ont un besoin en électrons supplémentaires (colonnes élevées).

Le pouvoir oxydant reflète précisément l'envie de capter des électrons. On voit que le fluor F est le plus oxydant des atomes ; mais il résout son problème en formant l'ion F^- . Ainsi en pratique, le fluor est très peu réactif puisqu'il se présente presque toujours sous forme d'ion F^- , très stable.

Le deuxième atome le plus oxydant est l'oxygène, et celui-ci ne peut pas résoudre son besoin en électrons par la formation d'un ion (O^{2-} impossible à cause de la double charge, voir dans le chapitre 1 « La réactivité chimique des atomes »). L'oxygène tend donc à former des molécules, dans lesquelles il se réagence facilement dans sa quête « farouche » en électrons supplémentaires.

Finalement, le dioxygène (constitué de deux atomes d'oxygène) est l'espèce oxydante par excellence : il a d'ailleurs donné son nom au mot « oxydant » ! C'est sans doute la meilleure source d'énergie chimique qu'on puisse envisager pour le développement d'une vie extraterrestre, comme c'est le cas sur Terre.



De l'abondance du dioxygène dans l'Univers...

L'exemple de la vie sur Terre montre qu'elle n'a pas besoin de dioxygène pour émerger : le rayonnement solaire suffit, même s'il est intermittent. En revanche, l'existence d'une source d'énergie plus constante semble indispensable pour aboutir à des « organismes intelligents ».

Sur Terre, c'est la vie elle-même qui a produit ce dioxygène qui lui sera si utile par la suite. En fait, la photosynthèse est le seul moyen efficace connu à ce jour pour produire du dioxygène. Cela explique que, dans le Système Solaire, la Terre soit la seule planète possédant du dioxygène. À l'avenir, la détection de dioxygène dans l'atmosphère d'une planète extrasolaire pourrait être un indice fort de l'existence de vie à sa surface.

Bien sûr, il n'est pas exclu qu'un jour soit découvert un autre mécanisme efficace de production du dioxygène, à partir de la matière inerte. À l'heure actuelle, le dioxygène semble néanmoins intimement lié à la vie.

À l'inverse, l'existence d'êtres vivants n'implique pas nécessairement la présence de dioxygène : sur Terre, il a fallu attendre plusieurs milliards d'années avant que le dioxygène commence à s'accumuler. Nous en avons vu une raison probable : le dioxygène réagissait au fur et à mesure avec les espèces réductrices dégagées par le volcanisme terrestre. Heureusement, la radioactivité diminuant à l'intérieur de la Terre, l'énergie terrestre a peu à peu diminué et le volcanisme a faibli. Ainsi, la surface n'était plus autant renouvelée par des matériaux crachés de l'intérieur de notre planète : une fois cette surface oxydée par le dioxygène, celui-ci a pu commencer à s'accumuler dans l'atmosphère.

Si la Terre avait été plus grosse, elle aurait conservé son énergie

interne beaucoup plus longtemps, et elle continuerait à cracher beaucoup de matériaux par les volcans encore aujourd'hui. Au contraire, si la Terre avait été plus petite, son noyau se serait refroidi jusqu'à se solidifier, et le champ magnétique aurait disparu : l'atmosphère aurait subi d'autant plus de radiations, et se serait échappée faute de gravité suffisante, comme sur Mars.

La taille de la planète est donc critique pour que le dioxygène puisse s'accumuler dans l'atmosphère, ce qui réduit sensiblement les candidates possibles autour d'autres étoiles que le Soleil...

Résumons : la planète ne doit pas être trop près de l'étoile pour que de l'eau liquide puisse exister. Elle ne doit pas être trop petite pour pouvoir retenir son atmosphère. Elle ne doit pas être trop grosse pour que le dioxygène puisse s'accumuler. Enfin, elle ne doit pas être trop loin de l'étoile car l'énergie lumineuse moins intense y rendrait le développement de la vie plus difficile.

La Terre semble décidément être un cas de plus en plus exceptionnel, dans la perspective du développement d'une vie intelligente...

La photosynthèse, un processus complexe

Le dioxygène pourrait-il exister sur une planète en l'absence d'êtres vivants ? Il faudrait pour cela qu'il puisse être créé efficacement à partir de la matière inerte. De fait, l'équation-bilan de la photosynthèse est extrêmement simple, et le dioxygène semble pouvoir être produit facilement :



Hélas, les mécanismes qu'elle cache sont extrêmement complexes. En fait, la lumière visible du soleil est incapable de briser une simple molécule d'eau H_2O pour former O_2 . Seuls les ultraviolets le peuvent, et c'est effectivement ce qui se produit dans la haute atmosphère terrestre. Le problème est que les ultraviolets brisent également le O_2 formé : il est donc impossible d'accumuler beaucoup de dioxygène par ce biais.

Comment les organismes vivants arrivent-ils à contourner le problème ? En pratique, la chlorophylle est constituée de longues molécules qui se

chargent de capter la lumière visible sur une grande surface, et de faire converger toutes les énergies vers un cœur où se trouvent les molécules d'eau. C'est ce qui permet d'atteindre le seuil d'énergie nécessaire pour transformer H_2O en O_2 , sans pour autant briser le O_2 formé. L'architecture complexe nécessaire pour effectuer cette « convergence des énergies » semble impossible à réaliser en l'absence d'organismes vivants : une structure aussi complexe doit pouvoir être dupliquée pour subsister.

On comprend pourquoi la détection du dioxygène dans les atmosphères des exoplanètes est un enjeu majeur aujourd'hui, puisqu'il s'agit d'un indice fort de la présence d'êtres vivants. Cette tâche n'est pas hors de portée : en effet, une forte proportion de dioxygène dans une atmosphère entraîne l'existence d'ozone, et cette molécule possède une « signature » très forte qu'il serait possible de détecter depuis la Terre, à condition de disposer d'un dispositif de grande ampleur.

Les projets européen Darwin et américain Terrestrial Planet Finder avaient cet objectif, mais ils ont été récemment annulés ou retardés. Néanmoins, il ne fait aucun doute que d'ici quelques dizaines d'années, nous aurons les moyens de sonder les atmosphères des exoplanètes. Alors nous aurons une première idée du peuplement des systèmes planétaires proches...

Notons enfin que la photosynthèse effectuée par la vie n'a pas du tout pour but de créer du dioxygène : dans l'équation précédente, c'est $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ qui intéresse les organismes, et pas O_2 qui n'est qu'un simple « déchet » de la réaction. En effet, le but est de créer les molécules organiques nécessaires à la vie, à partir du dioxyde de carbone atmosphérique CO_2 . En d'autres termes, c'est la transformation $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ qui intéresse les végétaux, mais cela permet au passage d'effectuer la transformation $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2$ si intéressante pour l'Homme...

Quels substituts au dioxygène ?

Le dioxygène est-il vraiment indispensable au développement d'un organisme aussi complexe que l'Homme ? Nous avons mis en avant son principal atout : il s'agit d'une source d'énergie à la fois puissante et constante. Sur d'autres planètes, d'autres sources d'énergie pourraient-elles s'y substituer ?

Passons d'abord en revue les sources primaires d'énergie. À première vue, la lumière solaire semble être toujours variable, du

fait de la rotation des planètes (cycle jour – nuit). Mais il en est tout autrement si la planète est très proche de son étoile : dans ce cas, les forces de marée peuvent conduire la planète à présenter toujours la même face à l'étoile.

Dans le système solaire, tous les gros satellites des géantes gazeuses ont ainsi une face perpétuellement tournée vers la planète, et l'autre face toujours tournée « vers l'extérieur ». Pour que ce phénomène se produise sur une planète, il faut que celle-ci soit vraiment très proche de son étoile, afin que les forces de marée soient suffisamment intenses.

Autour d'une étoile comme le Soleil, il faudrait que la planète soit plus proche que l'orbite de Vénus, or à cette distance la présence d'eau liquide devient impossible. En revanche, autour d'une naine rouge, la planète peut être beaucoup plus proche de son étoile tout en gardant son eau liquide, car l'énergie émise par une naine rouge est beaucoup plus faible que celle du Soleil. Ainsi, la planète peut avoir un environnement favorable à l'émergence de la vie, tout en présentant systématiquement la même face vers son étoile. Dans une telle situation, le côté jour est perpétuellement éclairé (l'étoile ne semble pas bouger dans le ciel de la planète) : le rayonnement solaire devient une source intense et constante d'énergie.

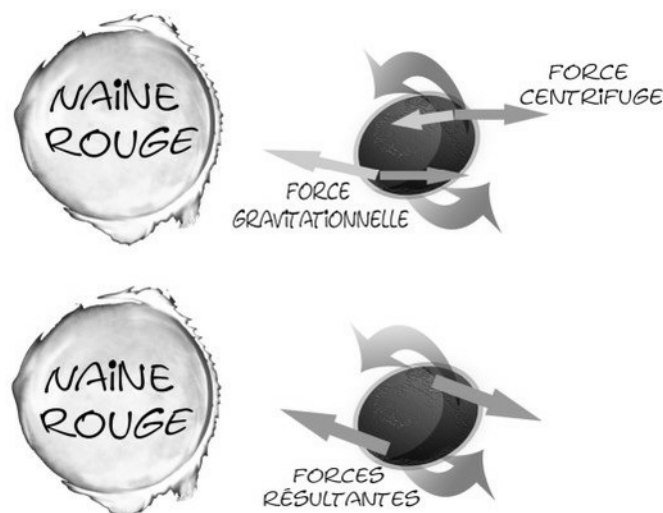
Il n'est pas exclu que la vie puisse alors se développer jusqu'à former des organismes complexes macroscopiques comme sur Terre. Des êtres intelligents pourraient-ils ensuite émerger, même en l'absence de dioxygène ? Rien n'est moins sûr... Sur Terre, la vie s'est divisée en deux ensembles qui fondent leur développement sur deux sources d'énergie différentes : la flore optimise l'exploitation du rayonnement solaire, tandis que la faune optimise l'exploitation du dioxygène. Sur une planète démunie de dioxygène, il n'est donc pas assuré qu'une faune puisse se développer.

Des végétaux pourraient-ils néanmoins acquérir une « intelligence supérieure » ? En fait, c'est probablement la mobilité des animaux et la mise en place de stratégies d'acquisition de nourriture qui a naturellement entraîné l'essor de l'intelligence sur Terre. Il n'est pas certain que des végétaux puissent acquérir une telle mobilité, donc une telle intelligence, même en présence d'une source de lumière constante : nous reviendrons largement sur ce point dans le chapitre 4.

Malgré tout, les planètes proches de naines rouges pourraient être de bonnes candidates dans la recherche de vie macroscopique, fût-elle confinée au règne végétal. C'est d'autant plus intéressant que les naines rouges sont les étoiles les plus abondantes dans la Galaxie, puisque leur durée de vie est très longue...

L'implacable étau des forces de marée

Supposons qu'une planète orbitant autour d'une naine rouge tourne très vite sur elle-même. À cause des effets de marée, elle est déformée en « ballon de rugby » par la présence de la naine rouge. Mais du fait de l'inertie lors de la rotation, ce ballon est légèrement décalé par rapport à la direction de la planète (voir premier schéma ci-dessous).



On voit alors que les forces de marée tendent non seulement à « écarteler » la planète, mais aussi à freiner sa rotation (deuxième schéma). Ainsi, la rotation de la planète ralentit peu à peu, jusqu'à

présenter toujours la même face vers son étoile : il n'y a alors plus aucun effet d'inertie, et le ballon de rugby n'est plus décalé par rapport à la direction de l'étoile.

Finalement, la planète connaît un hémisphère perpétuellement éclairé par la naine rouge, et l'autre toujours plongé dans la nuit...

Il reste les deux autres sources d'énergie primaire : celle liée au « malaxage » de la planète par les forces de marée d'une part, et celle liée à la radioactivité. Les deux se manifestent par le volcanisme et les séismes : l'énergie d'un volcan peut-elle suffire pour développer une vie intelligente ? Cela semble incertain : cette source d'énergie est chaotique et très localisée, à l'opposé de la source stable et globale qu'est le dioxygène.

Comme nous l'avons vu, la vie sur Terre s'est adaptée à l'environnement des volcans sous-marins au niveau des dorsales océaniques. Mais il s'agit probablement d'une adaptation ultérieure, à partir de cellules déjà très complexes construites à proximité de la surface.

On pourrait citer de même les éclairs, qui se déclenchent sous certaines conditions dans les atmosphères planétaires : l'expérience de Miller de 1953 a montré que de tels éclairs pouvaient permettre de créer des acides aminés. Mais la foudre n'est en aucun cas une source d'énergie stable dans le temps, en contradiction avec les besoins manifestes de la vie. Ainsi, si les éclairs peuvent éventuellement aider à l'émergence de la vie, ils doivent forcément être complétés par des sources d'énergie plus stables pour permettre son développement jusqu'à l'intelligence.

Enfin, parmi les sources d'énergie chimique possibles, aucune ne semble en mesure d'égaler le dioxygène : parmi les espèces chimiquement très réactives, le dioxygène est clairement la plus simple (il s'agit simplement de deux atomes d'oxygène « accolés »). On peut toujours imaginer que d'autres espèces chimiques jouent un rôle majeur sur d'autres planètes ; mais il y a

peu de chance que ces espèces y soient aussi abondantes et puissantes que le dioxygène sur Terre...

Finalement, la seule source d'énergie constante capable de remplacer le dioxygène est le rayonnement de l'étoile lui-même. L'énergie de l'étoile semble bel et bien être la pièce maîtresse du développement de la vie : son rayonnement doit intervenir ou bien directement, ou bien indirectement en créant du dioxygène par le biais de la photosynthèse...

Les éclairs

Lorsque vous enlevez un pull en laine, vous créez des étincelles associées à des crépitements caractéristiques : la raison est que les frottements ont arraché des électrons du vêtement pour les déposer sur vos cheveux. Finalement, votre pull est devenu chargé, et s'est empressé de se décharger par le biais de petits éclairs inoffensifs.

De même, quand l'atmosphère est agitée à la fin de l'été, de vastes mouvements de convection apparaissent dans l'air, notamment dans les nuages appelés « cumulonimbus » : cela crée des frictions qui arrachent des électrons de certaines molécules d'air pour se déposer sur d'autres molécules. Ainsi, il apparaît des zones chargées dans le nuage.

Au-delà d'une certaine charge, le nuage se décharge brutalement par le biais d'un éclair, comme votre pull en laine. Les charges en jeu dans les cumulonimbus sont toutefois bien plus colossales : l'énergie dégagée par la foudre est considérable !

Ces mouvements de convection dans l'air sont dus à des variations de température importantes : c'est la raison pour laquelle les orages se produisent plutôt à la fin de l'été et en fin de journée, quand les températures très chaudes baissent subitement. Or ces variations de température sont dues à l'énergie du rayonnement solaire déposée pendant l'été et pendant la journée : l'énergie de la foudre est bel et bien entièrement issue de l'énergie du Soleil, bien que de façon indirecte.

L'énergie solaire est décidément la source d'énergie ultime de la plupart des phénomènes sur Terre...

Un danger externe : Astéroïdes et

comètes

Maintenant que nous avons passé en revue toutes les conditions favorables au développement de la vie, il s'agit de ne pas oublier les dangers qui la guettent, et qui pourraient réduire sensiblement le nombre d'environnements favorables au sein de la galaxie.

L'un des principaux dangers pour la vie sur Terre réside dans la collision avec un autre corps. Les astéroïdes sont des corps rocheux qui circulent un peu partout dans le Système Solaire, et dont la taille peut aller d'une simple poussière jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.

Définition **Astéroïdes** : petits corps tournant autour du Soleil selon une orbite faiblement elliptique (à l'inverse d'une comète). Il s'agit de résidus du Système Solaire primordial qui n'ont pas encore été captés par les planètes. Lorsqu'un astéroïde entre en collision avec une planète, on parle de météorite.

Les comètes, quant à elles, ont une origine beaucoup plus externe. En effet, au-delà de l'orbite de Neptune, se trouve toute une myriade de planétoïdes qui forment ce qu'on appelle la « ceinture de Kuiper ». Pluton, qu'on élevait autrefois au rang de planète, est un simple composant de cette ceinture parmi de nombreux autres. Notons qu'il n'est d'ailleurs pas le plus gros représentant connu parmi les corps lointains : Éris, découvert en 2005, le dépasse avec près de 3 000 km de diamètre, et il n'est pas impossible que beaucoup d'autres corps de cette taille soient détectés à l'avenir.

Plus on s'éloigne du Soleil, plus les planétoïdes ont des orbites inclinées et excentriques, alors que les planètes ont au contraire des orbites bien circulaires qui sont toutes dans le même plan (appelé « écliptique »). À partir d'une certaine distance (près de dix mille fois la distance Terre-Soleil !), les corps s'avèrent répartis

de façon sphérique tout autour du Soleil : il s'agit du nuage de Oort.

Les comètes sont des corps appartenant jadis à la ceinture de Kuiper ou au nuage de Oort, et dont l'orbite a été déstabilisée. En pratique, le nuage de Oort s'étend tellement loin que les nuages de deux étoiles voisines peuvent parfois s'interpénétrer, créant des perturbations gravitationnelles : c'est ce qui peut pousser certains corps à plonger vers l'intérieur du Système Solaire, sous la forme de comètes. Comme elles ont été formées très loin du Soleil, elles sont riches en glace d'eau : en s'approchant du Soleil, cette glace commence à se sublimer, ce qui crée une partie de la fameuse « queue » des comètes, bien visible à l'œil nu pour les plus lumineuses d'entre elles.

Définition

Comète : Corps riche en glace d'eau provenant des régions externes du Système Solaire, dont l'orbite initiale a été déstabilisée par des influences gravitationnelles. Ce corps développe une queue lumineuse à l'approche du Soleil, sous l'action de ses rayonnements.

Face aux astéroïdes ou aux comètes, la principale protection de la Terre est son atmosphère : les corps les plus petits s'embrasent lorsqu'ils y pénètrent à grande vitesse, formant les fameuses étoiles filantes, et se désintègrent avant d'avoir atteint le sol. Mais les plus gros créent des cratères d'impact, avec des conséquences qui peuvent être dévastatrices.

Les poussières dégagées par les plus gros impacts sont soulevées avec une telle énergie qu'elles gagnent la stratosphère, où elles peuvent rester pendant plusieurs centaines d'années avant de retomber au sol. Elles y arrêtent le rayonnement solaire, et une pénombre permanente s'installe alors sur Terre : c'est une catastrophe pour la vie à la surface, qui est entièrement basée sur l'énergie solaire !

De fait, l'extinction des dinosaures et de bien d'autres espèces il y a 65 millions d'années est due à l'impact d'un astéroïde, lequel marque le passage de l'ère secondaire à l'ère tertiaire. Plus spectaculaire encore, la Lune est issue d'un choc inouï avec un corps de la taille de Mars, au tout début de l'Histoire du Système Solaire. Les débris éjectés par la collision furent tellement considérables qu'ils finirent par se rassembler pour former notre satellite.

Notons que la répétition d'un tel épisode paraît impossible aujourd'hui : cela s'est produit alors que le Système Solaire était en cours de formation, et contenait un grand nombre de planétoïdes dont les orbites s'entrecroisaient. Cet impact ayant créé la Lune est donc l'une de ces innombrables collisions qui ont contribué à faire grossir la Terre et à l'amener jusqu'à sa masse actuelle, au tout début de son Histoire. Ce type de scénario allant jusqu'à la formation d'un satellite ne semble toutefois pas très commun, comme le montre l'absence de gros satellites autour des autres planètes telluriques...

Plus le temps passe, plus le Système Solaire tend à « faire le ménage » dans les astéroïdes résiduels, et plus les probabilités d'impact tendent à diminuer. Pourtant, aujourd'hui encore, la possibilité de collision avec un astéroïde « géocroiseur » reste réelle. De plus, le nuage de Oort reste un réservoir inépuisable de comètes...

Les planètes naines

En 2005, Pluton était encore reconnue comme l'une des « neuf » planètes du Système Solaire, malgré sa petite taille. La découverte de plusieurs autres corps lointains de taille similaire dans les années 2000 a conduit à détrôner enfin Pluton de son statut de planète, car cela aurait conduit à une multiplication indéfinie du nombre de planètes au fur et à mesure des découvertes. Ce nombre a donc été ramené à huit, et de toute évidence il ne bougera plus dorénavant.

En revanche, il a fallu donner un nouveau statut à Pluton et à ses homologues : on leur donne officiellement le nom de « planètes naines » depuis 2006. Par définition, une planète naine doit être assez massive pour avoir une géométrie approximativement sphérique du fait de la gravitation, ce qui exclut les innombrables corps de quelques centaines de kilomètres de diamètre. Par ailleurs, une planète naine ne doit pas avoir « fait le ménage » dans son environnement, c'est-à-dire qu'elle doit naviguer en compagnie de nombreux autres corps : cela permet de distinguer ces planètes naines des huit planètes du Système Solaire, qui sont solitaires sur leurs orbites. À l'inverse, cela permet d'inclure tous les corps de la ceinture d'astéroïdes, de la ceinture de Kuiper, et au-delà jusqu'au nuage de Oort.

Cinq planètes naines ont été recensées :

- Cérès dans la ceinture d'astéroïdes (presque 1 000 km de diamètre).
- Les quatre autres dans la ceinture de Kuiper : Éris (2 600 km de diamètre), Pluton (2 300 km), Haumea (2 000 à 2 500 km) et Makemake (1 200 à 1 900 km).

Par ailleurs, certaines planètes naines possèdent leurs propres satellites : Pluton en a trois, dont l'un, Charon, est particulièrement gros. Éris en a un recensé à ce jour, et Haumea en a deux.

Précisons enfin que cette liste de planètes naines est vouée à augmenter de façon régulière à l'avenir : la détection des corps lointains n'en est qu'à ses débuts. En revanche, Cérès restera définitivement le seul astéroïde dans cette liste.

Un danger interne : Le volcanisme

Nous avons parlé de la crise qui s'est produite entre l'ère secondaire et l'ère tertiaire, avec la disparition des dinosaures. Mais une autre crise encore plus considérable a caractérisé le passage de l'ère primaire à l'ère secondaire. Or, cette fois, les causes ne semblent pas être dues à une collision.

En pratique, le volcanisme terrestre peut avoir des conséquences très similaires à celles d'un impact d'astéroïde : une éruption particulièrement violente peut éjecter des poussières jusqu'à la stratosphère, et celles-ci peuvent y voiler durablement la lumière du Soleil. Or la crise à la fin de l'ère primaire coïncide avec une

situation unique : l'union de toutes les terres du globe en un seul super-continent, la Pangée. Le volcanisme terrestre apparaissant notamment dans le cadre de la tectonique des plaques, il n'est pas impossible que cette situation ait entraîné un épisode d'activité volcanique inhabituelle. Les causes réelles de cette crise sont encore mal élucidées aujourd'hui, mais il paraît clair que la vie a autant à craindre de dangers internes (volcanisme) que de dangers externes (astéroïdes et comètes).

À chaque crise rencontrée, la vie a pourtant su « rebondir » avec beaucoup de vigueur. Aurait-elle pu être éradiquée par un épisode encore plus violent ? A-t-elle eu une chance exceptionnelle de subsister malgré tous ces dangers ? Une vie extraterrestre pourrait-elle de même résister aux volcans et aux météorites pendant plusieurs centaines de millions d'années ?

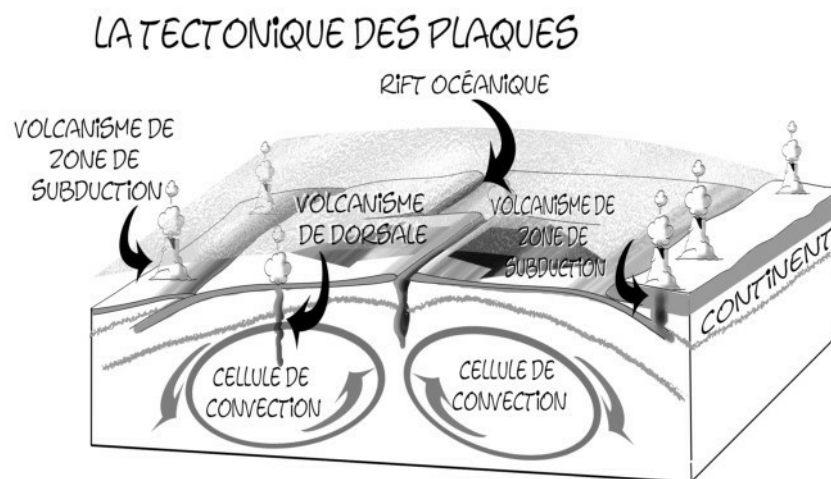
En fait, si les extinctions qui ont eu lieu dans l'Histoire de la Vie semblent impressionnantes (95 % des espèces marines et 70 % des espèces terrestres disparues à la fin de l'ère primaire !), la vie en tant que telle n'a jamais été vraiment menacée. Aujourd'hui, certains organismes vivants ont colonisé les fonds sous-marins près des dorsales océaniques, et ne dépendent plus de l'énergie solaire. Un cataclysme éradiquant la vie basée sur la photosynthèse pourrait donc ne pas toucher ces organismes indépendants. Certes il faudrait plusieurs dizaines de millions d'années avant de reformer un nouvel écosystème à l'échelle de la planète ; néanmoins la structure de la vie à l'échelle microscopique serait sauvegardée.

Étant donné la robustesse de la vie et sa diversité, il paraît véritablement inconcevable que toute cellule vivante disparaisse un jour de la Terre. Notons qu'il en irait de même si l'Humanité « dérapait » et déclençait un cataclysme nucléaire à l'échelle planétaire... L'Homme serait peut-être éradiqué, et avec lui la plupart des animaux et des végétaux. Mais certains organismes

blottis dans des niches protégées subsisteraient, et finiraient par recréer un nouvel écosystème à la surface de la Terre. Et si l'environnement revient à l'identique, alors il n'est pas exclu que ce nouvel écosystème ressemble fortement au précédent, avec de nouveaux êtres intelligents qui émergeraient un jour...

Volcans et dérive des continents

Sur Terre, la tectonique des plaques est produite par les mouvements de convection dans le manteau : pour dégager l'énergie thermique libérée par la radioactivité, de vastes cellules se forment à l'intérieur de la Terre, de même que des cellules de convection apparaissent dans l'eau d'une casserole qu'on fait chauffer fortement. Ces cellules provoquent la mise en mouvement de la croûte plus froide située au-dessus : à chaque cellule correspond une plaque tectonique, chacune se déplaçant dans une direction différente.



Si ce modèle très simple explique parfaitement les chaînes de montagnes, les rifts, ou encore la forme de certains continents, un constat demeure intrigant : la Terre est la seule planète du Système Solaire dotée d'une tectonique des plaques. Est-ce donc un processus si difficile à déclencher ? Qu'est-ce qui pourrait justifier que la Terre soit un cas unique ?

Une première réponse réside dans l'énergie thermique à dégager : plus une planète est petite, plus elle est froide. En effet, l'énergie contenue dans le volume d'une planète est évacuée par la surface, et le rapport surface/volume est plus élevé pour une petite planète. Ainsi, les petits corps sont trop froids pour être fluides à l'intérieur : aucun mouvement de convection n'est possible, ce qui explique notamment l'absence de

tectonique des plaques sur Mercure ou sur Mars.

Le cas de Vénus est plus intrigant : elle est de même taille que la Terre, et a donc la même énergie à évacuer, avec une même surface pour l'évacuer. L'intérieur de Vénus doit donc être aussi chaud que celui de la Terre, et il devrait être aussi fluide.

Mais il y a une différence fondamentale entre les deux : Vénus a perdu toute son eau au cours de sa formation, alors que la Terre l'a retenue sous forme liquide. Grâce à l'eau, la couche supérieure du manteau terrestre est plus fluide, et les roches à ce niveau sont plus malléables : c'est ce qui autorise un déplacement des plaques, avec des zones de « plongeon » (subduction) et « d'émergence » (dorsales océaniques notamment).

Sur Vénus au contraire, les roches moins fluides sont plus figées : l'énergie interne ne peut que percer localement en certains points fixes de la croûte. On parle de « volcanisme de point chaud ». Sur Terre, ce type de volcanisme existe (volcans des îles Hawaï, de La Réunion, etc.), mais il reste minoritaire par rapport au volcanisme lié au mouvement des plaques : volcanisme des dorsales océaniques d'une part, volcanisme des chaînes montagneuses de subduction d'autre part.

Finalement, le phénomène de tectonique des plaques est plutôt sous-représenté dans le Système Solaire : il suffit a priori d'une grosse planète contenant de l'eau pour qu'il se mette en route. Les planètes dotées d'une tectonique des plaques doivent donc être assez fréquentes dans la galaxie.

Les radiations nocives du Soleil

Le rayonnement d'une étoile constitue une source d'énergie très précieuse pour la vie. Mais il peut aussi se révéler nocif. Outre la lumière visible, une étoile émet aussi des infrarouges, qui sont plutôt « doux », et des ultraviolets, qui sont plutôt « agressifs ». Les ultraviolets sont tellement énergétiques qu'ils ne se contentent pas d'amorcer les réactions chimiques : ils tendent à casser les molécules en plusieurs morceaux. Ils sont donc plutôt hostiles à la vie, qui est précisément basée sur de grosses molécules.

En fait, dans certains cas, casser des molécules de façon temporaire peut être utile pour en reformer de nouvelles. Par exemple, en cassant le dioxygène de l'air, les ultraviolets les plus « durs » créent deux atomes d'oxygène. Ces atomes d'oxygène,

très instables, vont se coller à la première molécule rencontrée : s'il s'agit d'une molécule de dioxygène, cela forme une molécule d'ozone, formée de trois atomes d'oxygène.

L'ozone est lui-même très réactif, plus encore que le dioxygène, et il tend à être détruit très facilement par les ultraviolets, même les moins « durs » (c'est-à-dire les moins énergétiques) : cela implique que les UV ne peuvent pas traverser une couche d'ozone, puisqu'ils interagissent avec les molécules. Finalement, on voit que les ultraviolets « très durs » créent l'ozone qui empêche les UV « peu durs » de passer : en quelque sorte, les ultraviolets s'empêchent eux-mêmes de passer en créant cette barrière.

Dans cet exemple, on voit que l'existence de l'ozone est liée aux ultraviolets qui cassent le dioxygène : le fait de casser une molécule permet donc bien d'en former de nouvelles, ce qui peut être bénéfique. De même, les ultraviolets qui arrivent sur notre peau nous permettent de synthétiser de la mélanine et de bronzer, ce qui nous protège des UV suivants : là encore, les UV permettent de créer des molécules qui forment une barrière contre les UV.

Cet aspect bénéfique et « constructeur » des ultraviolets disparaît s'ils sont trop nombreux, ou trop énergétiques : sans la couche d'ozone, l'Homme ne pourrait pas vivre à la surface de la Terre (bronzé ou pas...), car les UV venant du Soleil détruiraient ses cellules. C'est la raison pour laquelle la vie s'est développée sous l'eau pendant des milliards d'années, et ne s'est approchée de la surface que lors de « l'explosion » du Cambrien, il y a 565 millions d'années, lorsque l'ozone a commencé à s'accumuler dans la haute atmosphère. La proportion d'UV doit donc être savamment dosée pour être bénéfique...

De plus, les ultraviolets ne sont pas les seules radiations hostiles à la vie qui arrivent sur Terre. Le Soleil émet aussi des particules

chargées très rapides, qui forment le « vent solaire » : comme les ultraviolets, celles-ci tendent à casser les molécules quand elles les heurtent. C'est le champ magnétique terrestre qui nous protège de ces radiations : sans lui, l'environnement terrestre serait certainement plus agressif, et l'atmosphère tendrait peut-être à s'éroder davantage.

Définition **Vent solaire** : Particules chargées, émises à grande vitesse par le Soleil, qui baignent l'ensemble du Système Solaire. Il s'agit de radiations hostiles à la Vie.

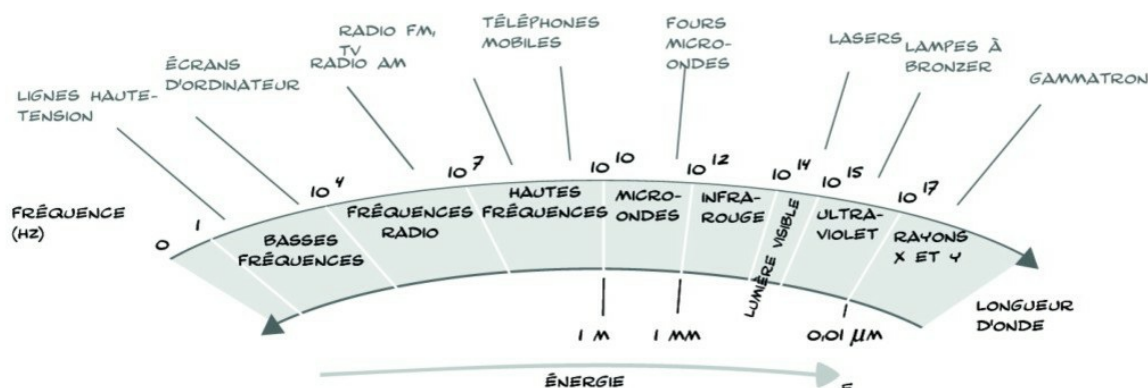
Le danger manifeste de toutes ces radiations implique que certaines étoiles sont sans doute plus hostiles que d'autres pour le développement de la vie. En effet, si le Soleil est particulièrement stable, beaucoup d'étoiles possèdent une activité plus chaotique, et émettent de dangereuses radiations de façon irrégulière.

Cette instabilité a surtout lieu aux débuts de la vie de l'étoile, peu après sa formation. Les naines rouges, qui ont la durée de vie la plus longue, sont aussi celles qui connaissent la plus longue période d'instabilité : environ un milliard d'années. La vie pourrait donc devoir attendre tout ce temps avant de pouvoir émerger autour de telles étoiles.

De plus, les naines rouges sont suffisamment petites et froides pour que toute leur énergie interne soit évacuée vers la surface par le biais de cellules de convection, conduisant à une activité de surface très « chaotique », avec des éruptions fréquentes qui entraînent des bouffées de rayonnements nocifs. L'environnement des naines rouges est donc très souvent instable, même chez les plus âgées d'entre elles.

Les naines rouges sont-elles donc de mauvaises candidates à la recherche de vie intelligente ? Il ne faut pas oublier qu'une petite instabilité de l'étoile pourrait être au contraire favorable à la vie : l'exemple de l'Histoire de la vie sur Terre montre qu'elle est

capable d'exploiter des périodes de « stress » environnemental, grâce à la mise en place de mutations plus intenses. À ce niveau, toutes les hypothèses restent donc ouvertes...



Les différents types de rayonnements

La lumière, les infrarouges et les ultraviolets font partie de toute une gamme de rayonnements de même nature, appelés « ondes électromagnétiques ». En voici la liste, des moins « agressifs » aux plus « violents », avec une précision sur leur origine et leur utilisation :

- Ondes radio : Elles sont utilisées sur Terre pour de nombreuses communications sans fil, notamment radio comme leur nom l'indique. Elles sont aussi émises par n'importe quel fil électrique, en particulier par les lignes à haute tension. Nous sommes donc en permanence immergés dans les ondes radio, mais sans véritable conséquence sur la santé car ce sont des rayonnements très doux. C'est ce qui explique qu'ils puissent traverser les murs sans heurts (on capte la radio de chez soi...).
- Micro-ondes : Elles sont utilisées sur Terre dans les téléphones portables, ou encore dans les fours du même nom. L'Univers tout entier baigne dans des micro-ondes, qui constituent un lointain témoignage de l'émission de rayonnement qui a eu lieu peu après le Big Bang. Les micro-ondes sont en général inoffensives, sauf certaines fréquences bien particulières utilisées à très forte dose, telles que celles émises dans les fours.
- Infrarouges : Tout corps émet des infrarouges, d'autant plus intenses que ce corps est chaud. Les caméras infrarouges exploitent cette propriété pour repérer les corps chauds dans l'obscurité. Les rayonnements infrarouges sont donc omniprésents dans l'Univers.
- Lumière visible : Elle est émise dès qu'un corps dépasse quelques

milliers de degrés : c'est donc surtout le cas des étoiles, mais aussi de la lave terrestre ou de la flamme d'une bougie. Ce sont les ondes électromagnétiques auxquelles nous sommes le plus habitués.

- **Ultraviolets** : Les véritables dangers pour la vie commencent à ce niveau. Les étoiles en émettent en faible quantité, mais suffisamment pour détruire les cellules : la vie ne pourrait pas exister sans la présence de l'atmosphère. En particulier, la couche d'ozone est la meilleure des protections, qui s'applique même face aux ultraviolets les moins énergétiques.
- **Rayons X** : Dans l'Univers, ils sont toujours liés à des événements violents, mettant souvent en jeu des interactions entre des masses énormes. Sur Terre, ils sont utilisés dans l'imagerie médicale, mais une exposition prolongée est dangereuse pour la santé car il s'agit de rayonnements très nocifs, même à faible dose.
- **Rayons gamma** : Ce sont les rayonnements émis par la matière radioactive, dans les réacteurs des centrales nucléaires, ou par les bombes nucléaires. Dans l'Univers, des rayons gamma peuvent être émis à l'issue d'événements cataclysmiques (collisions à grande vitesse, explosions...). Ce sont les plus dangereux de tous.

Un environnement galactique hostile...

L'étoile autour de laquelle la planète évolue n'est pas la seule source de radiations hostiles : ainsi, des radiations venues d'autres endroits de la galaxie et de l'Univers arrivent en permanence dans le Système Solaire, et atteignent la Terre (on parle de « rayons cosmiques »). Elles peuvent être dues à des événements violents qui surviennent ici ou là dans l'Univers : collision d'étoiles, explosions en supernovæ, influence d'un trou noir... Là encore, le champ magnétique et l'atmosphère de la Terre nous protègent d'une partie de ces radiations.

Définition **Rayons cosmiques** : rayons gamma et particules chargées énergétiques baignant l'espace interstellaire et intergalactique, dus aux événements astrophysiques violents qui surviennent un peu partout dans l'Univers. Ils sont très hostiles à la Vie.

À ce niveau, un constat s'impose : la Terre est située très à l'écart du cœur galactique, dans une région plutôt pauvre en étoiles. Certes le ciel nocturne est de ce fait bien moins chatoyant que celui d'une planète située près du centre de notre galaxie ; mais, de par son isolement, la Terre est davantage protégée des événements catastrophiques survenant régulièrement ailleurs dans la galaxie.

Si une supernova explosait à quelques années-lumière de notre planète, les radiations émises mettraient probablement en danger la vie sur Terre. En étant à l'écart de toute concentration d'étoiles, la Terre évite ce risque, ce qui est une garantie de stabilité pour la vie.

La vie pourrait-elle donc se développer à proximité du centre galactique ? C'est une question importante, car c'est précisément là qu'il y a le plus d'étoiles, autour desquelles la vie est le plus susceptible d'apparaître. Mais c'est aussi là qu'il y a le plus de supernovæ, susceptibles de mettre cette vie en péril...

En fait, à ce jour, il est impossible de dire si l'isolement relatif de la Terre est bel et bien un atout, ou si ce n'est qu'un hasard. Après tout, la vie semble avoir résisté à toutes les catastrophes survenues dans l'Histoire de la Terre, et semble même les avoir exploitées par les mutations qui en ont découlé. Saurait-elle de même exploiter un environnement sidéral plus agressif, tel que celui agitant les abords du centre galactique ?

Les trous noirs, sources de rayons X

Lorsqu'une étoile massive a épuisé tout son combustible nucléaire, la pression de rayonnement ne compense plus la contraction gravitationnelle, et l'étoile s'effondre alors sur elle-même. Si elle est de masse solaire, la répulsion entre les atomes finit par compenser l'attraction gravitationnelle, et l'étoile devient une « naine blanche ». La matière d'une naine blanche est tellement compacte qu'un cube de 1 cm de côté pèse environ une tonne...

En revanche, dans les étoiles les plus massives, la pression devient tellement forte que les électrons et les protons s'interpénètrent, jusqu'à former des neutrons : l'astre devient une « étoile à neutrons ». Un cube d'un centimètre de côté pèse alors un milliard de tonnes !

Enfin, pour des masses initiales encore plus élevées, aucun processus connu ne peut compenser la contraction gravitationnelle, qui se produit théoriquement jusqu'à « l'infini », c'est-à-dire jusqu'à ce que toute la masse se retrouve concentrée en un unique point de l'espace (on parle de singularité gravitationnelle) ! Il s'agit alors d'un trou noir.

La lumière est attirée par toute masse se trouvant dans les parages. Dans le cas d'un trou noir, il existe une certaine distance en dessous de laquelle la lumière ne peut plus s'échapper, à cause de cette attraction gravitationnelle : cette distance limite forme « l'horizon » du trou noir.

Il est donc impossible de visualiser le centre d'un trou noir, puisqu'aucune lumière ne peut s'en échapper. En revanche, de la matière passant non loin de l'horizon d'un trou noir subit de telles forces qu'elle se met à émettre des rayons X très énergétiques : cela peut servir de « révélateur » permettant de déceler la présence du trou noir.

Enfin, outre les trous noirs issus de la mort d'une étoile massive, il existe aussi des trous noirs hypermassifs de quelques millions à milliards de masses solaires : en pratique, ils sont présents au cœur des galaxies. Ce type de trous noirs se « nourrit » des étoiles passant trop près, expliquant qu'ils se mettent à « grossir » démesurément.

De tels trous noirs sont des sources intenses de rayons X. Ceux-ci viennent s'ajouter aux radiations émises par les supernovæ, qui sont plus nombreuses près du cœur galactique : finalement, la région centrale de notre galaxie s'avère particulièrement hostile, et ce n'est peut-être pas un hasard si l'Homme s'est développé très à l'écart, vers la périphérie...

Notes

[\[1\]](#) Notons qu'il existe un effet contraire à plus court terme : les calottes polaires étant blanches, elles renvoient plus efficacement la lumière solaire vers l'Espace, ce qui tend à refroidir la Terre et à favoriser le développement des calottes. Ce « cercle vicieux » de court terme explique la mise en place de périodes de glaciation dans l'Histoire de notre planète. En revanche à plus long terme, l'influence du dioxyde de carbone dégagé redevient prépondérante.

Évasions extraterrestres

« Plus nous pénétrons dans l'inconnu, plus il nous semble immense et merveilleux ».

Charles Lindbergh

Maintenant que nous avons une idée des contraintes indispensables au développement de la vie, nous allons nous amuser à visiter la galaxie en faisant quelques sauts imaginaires de planète en planète. Nous allons pour cela baser notre voyage interstellaire sur des systèmes planétaires réels, qui ont été détectés depuis la Terre.

Exoplanètes : quinze ans de fructueuses découvertes !

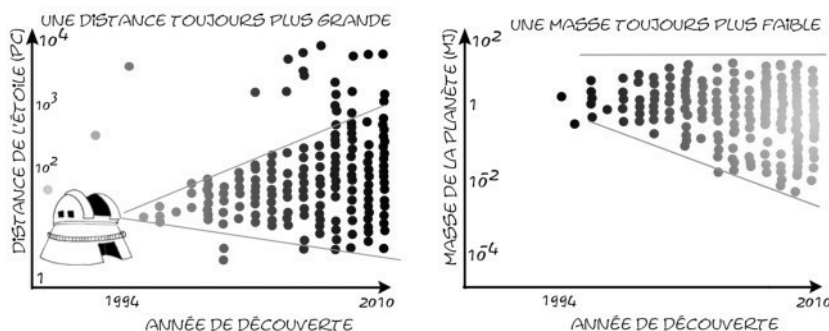
Le 6 octobre 1995, Michel Mayor et Didier Queloz annonçaient la découverte de la première planète orbitant autour d'une autre étoile que le Soleil^[1]. À n'en pas douter, cette date restera gravée dans l'histoire de l'Humanité, qui jetait pour la première fois son regard au-delà des huit planètes de son Système Solaire...

Définition **Année-lumière** : Distance parcourue par la lumière en un an. La lumière peut faire sept fois et demie le tour de la Terre en une seule seconde : l'année-lumière est cent mille fois plus élevée que la distance qu'il faut parcourir pour aller sur Mars.

À cette époque, il aurait été bien difficile de prévoir l'explosion

des découvertes qui allait suivre ! En 2010, le nombre de planètes connues a dépassé les 500, et nous bénéficions maintenant d'une première vision globale de la situation.

Évolution des découvertes



Données du site
<http://exoplanet.eu/catalog.php>

Sur les graphiques, chaque point représente une exoplanète découverte pendant l'année considérée. À gauche figure la distance des exoplanètes par rapport à la Terre (indiquée en parsecs : il faut multiplier par 3,26 pour l'obtenir en années-lumière). À droite, la masse de ces exoplanètes (comparée à la masse de Jupiter).

On constate que les planètes détectées se trouvent à des distances très variées : entre 10 et 1 000 années-lumière pour la plupart (ce qui est infime au regard de la taille de la galaxie). Il est intéressant de noter que les découvertes se font jusqu'à des distances de plus en plus lointaines au fur et à mesure que les années passent : c'est directement lié à l'évolution des techniques d'observation, de plus en plus précises.

Certaines exoplanètes ont même été détectées jusqu'à des distances de 10 000 années-lumière : elles apparaissent sous forme de points isolés en haut du graphique à partir de 2004. Cela est lié à la diversification des méthodes de détection. Jusqu'à présent, la majeure partie des exoplanètes était détectée grâce à une technique bien particulière appelée « méthode des vitesses

radiales » : elle consiste à observer les oscillations de l'étoile dues au mouvement de la planète en orbite autour d'elle. Mais de nouvelles techniques entrent maintenant en jeu, dont le domaine de prospection est bien distinct.

La principale est la méthode du transit astronomique, qui utilise le fait que la luminosité d'une étoile diminue lorsqu'une planète passe devant elle. C'est une méthode intéressante car elle peut donner des informations supplémentaires sur la planète telles que son diamètre ; mais encore faut-il que le système planétaire soit vu par la tranche depuis la Terre, ce qui se produit dans seulement 5 % des cas... Cette technique du transit doit donc balayer une gamme de distance considérable pour pouvoir réaliser suffisamment de détections.

Le rythme des découvertes aux faibles distances ne s'essouffle pas pour autant, ce qui montre qu'on est loin d'avoir « fait le tour » de notre petit coin de galaxie situé à proximité immédiate du Soleil. Les chercheurs sont en effet capables d'y détecter des planètes de plus en plus petites.

Un coup d'œil sur la masse des exoplanètes le confirme : alors qu'ils devaient se limiter aux planètes « de type Jupiter » à la fin des années quatre-vingt-dix, des planètes cent fois moins massives, c'est-à-dire de 2 à 3 fois la masse de la Terre, leur sont apparues depuis. C'est une nouvelle révolution car il s'agit probablement de planètes telluriques, avec des conditions qui pourraient être idéales pour la vie ! Il ne fait aucun doute que d'ici quelques années, les premières planètes de masse terrestre seront à notre portée...

Sur le graphique, on peut aussi constater l'existence d'une masse maximale des planètes, constante au fur et à mesure que les années s'écoulent, égale à environ 20 fois celle de Jupiter. C'est la limite du domaine des naines brunes : pour des masses plus

élevées, la fusion du deutérium peut s'amorcer à l'intérieur de l'astre et on ne parle plus de planète.

Le dernier constat que nous pouvons tirer de ces observations n'est pas le moindre : la proportion de planètes détectées très près de notre Système Solaire (à moins de 15 années-lumière) tend à augmenter avec les années, puisque nous détectons des planètes de moins en moins massives.

Or seuls 38 étoiles ou systèmes d'étoiles se trouvent à moins de 15 années-lumière du Soleil : que nous détectons de plus en plus de planètes autour de ces 38 étoiles confirme donc que les systèmes planétaires sont extrêmement répandus, qu'ils pourraient même environner la majorité des étoiles de la galaxie ! Rappelons que si nous observions le Système Solaire depuis Alpha du Centaure, seule Jupiter serait détectable à ce jour (la détection de Saturne serait délicate). Il resterait donc à découvrir huit fois plus de planètes autour du Soleil, notamment les quatre telluriques. Ainsi, même en se limitant aux 38 étoiles les plus proches, la très grande majorité des planètes reste sans doute hors de notre portée pour l'instant, et attend le regard de plus en plus perçant de nos télescopes...

À quoi ressemblent les systèmes planétaires observés ?

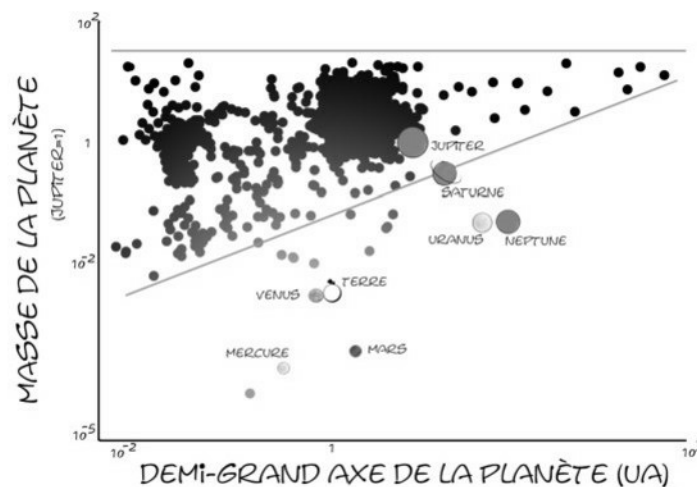
Définition **Unité astronomique** : Il s'agit de la distance moyenne Terre-Soleil, notée « UA » en abrégé. Elle sert d'unité pour les distances de planètes à leur étoile : par exemple, Mars est à 1,5 UA du Soleil, ce qui signifie qu'elle en est 1,5 fois plus éloignée que la Terre.

Observer directement une exoplanète avec un télescope est aujourd'hui impossible dans la majeure partie des cas. C'est la

raison pour laquelle une planète peut être détectée uniquement grâce aux perturbations qu'elle impose à l'étoile (perturbation du mouvement de l'étoile pour la méthode des vitesses radiales, perturbation de la luminosité de l'étoile pour la méthode du transit astronomique).

C'est pourquoi les planètes détectées en priorité sont les très grosses planètes situées très près de leur étoile : ce sont elles qui exercent l'influence la plus forte sur leur étoile. L'échantillon observé à ce jour n'est donc guère représentatif de la « norme » en vigueur dans la galaxie, mais il donne néanmoins quelques informations extrêmement intéressantes sur l'aspect des systèmes planétaires de notre petit coin de galaxie.

Distance des planètes à leur étoile



Données du site
<http://exoplanet.eu/catalog.php>

Le graphique représente la masse de la planète en fonction de sa distance à l'étoile : chaque point représente une exoplanète détectée. Les planètes du Système Solaire ont été ajoutées par comparaison.

Le « demi-grand axe » correspond à la distance de la planète à l'étoile, indiquée en unités astronomiques.

Sur le graphique de l'encart ci-dessus, le « biais observationnel »

évoqué apparaît clairement : à faible distance des étoiles, les astronomes détectent beaucoup de planètes, y compris des planètes assez peu massives par rapport à Jupiter (2 à 3 masses terrestres). Puis, plus ils s'éloignent de l'étoile, plus ils se limitent à des grosses planètes de type Jupiter. La limite inférieure des observations, représentée par la ligne droite, reflète donc une limite dans les capacités de détection : à l'avenir, elle sera repoussée de plus en plus vers le bas du graphique.

L'emplacement des huit planètes du Système Solaire a été indiqué pour comparaison : vous pouvez constater que seule Jupiter se trouve dans la « zone des planètes détectables ». Comme nous l'avons déjà indiqué, cela montre que Jupiter serait la seule planète « visible » depuis une autre étoile que le Soleil. Saturne entrera probablement dans cette zone d'ici quelques années. En revanche, il faudra sans doute attendre encore un peu avant de repérer un exact équivalent de la Terre, orbitant autour d'une étoile similaire au Soleil.

Par ailleurs, le principal enseignement du graphique est l'existence de deux zones riches en planètes de type Jupiter autour des étoiles. L'une se trouve comprise entre 0,6 et 6 unités astronomiques de distance par rapport à l'étoile : dans le Système Solaire, cette zone s'étend de Vénus à Jupiter. L'autre se trouve comprise entre 0,02 et 0,1 unité astronomique : dans cette zone, il n'existe aucune planète dans le Système Solaire (Mercure se trouve bien plus loin). Il s'agit donc d'une région incroyablement proche de l'étoile.

Pour expliquer cela, une hypothèse est envisageable : les systèmes planétaires se répartiraient en deux catégories ; ceux où les planètes ont migré au début de leur Histoire, et ceux où les planètes sont restées à leur place (comme dans le Système Solaire). Dans le premier cas, les géantes gazeuses se sont rapprochées jadis de leur étoile, expliquant qu'on les trouve à une

si faible distance de l'astre : les plus grosses ont réussi à conserver leur atmosphère d'hydrogène et d'hélium, tandis que les plus petites sont sans doute devenues des « planètes chtoniennes ».

Il faut rappeler que du fait des techniques de détection, ces planètes « migrantes » sont largement surreprésentées par rapport aux autres sur le graphique. Les géantes gazeuses situées entre 0,6 et 6 UA de l'étoile sont donc certainement les plus nombreuses.

Jupiter appartient précisément à cette zone, ce qui est plutôt rassurant : le Système Solaire semble être « dans la norme ». Mais cela se combine à un résultat inattendu : les géantes gazeuses apparaissent encore plus nombreuses au niveau des orbites de Mars, de la Terre, et même de Vénus (y compris autour d'étoiles semblables au Soleil). Ce constat est très troublant car il tend à remettre en cause les anciens modèles de formation.

Ainsi, de très gros noyaux rocheux pourraient se former même au niveau d'une orbite de type terrestre, suffisamment pour attirer une grande quantité d'hydrogène et d'hélium, et créer ainsi une géante gazeuse. Dans ce type de systèmes planétaires, la présence de planètes telluriques dotées d'eau liquide est sans doute impossible, puisqu'il existe des géantes gazeuses à la place. En revanche, certaines géantes gazeuses pourraient posséder des satellites suffisamment gros pour avoir pu garder une atmosphère et de l'eau liquide : les chances d'y trouver de la vie ne doivent donc pas être écartées.

Malgré les inconnues qui subsistent sur l'aspect réel des systèmes planétaires proches, nous pouvons d'ores et déjà émettre une conclusion d'une grande importance : le Système Solaire n'apparaît pas comme étant la norme dans la galaxie. Les systèmes planétaires semblent adopter des structures variées, dont celle du Système Solaire parmi bien d'autres. La perspective de trouver des alter ego du Système Solaire s'en trouve manifestement réduite. Est-ce une mauvaise nouvelle pour la

recherche de la vie ? Une chose est sûre : la Nature continuera à nous surprendre, et cela concernera peut-être aussi le domaine du vivant...

Quels types d'étoiles possèdent des planètes ?

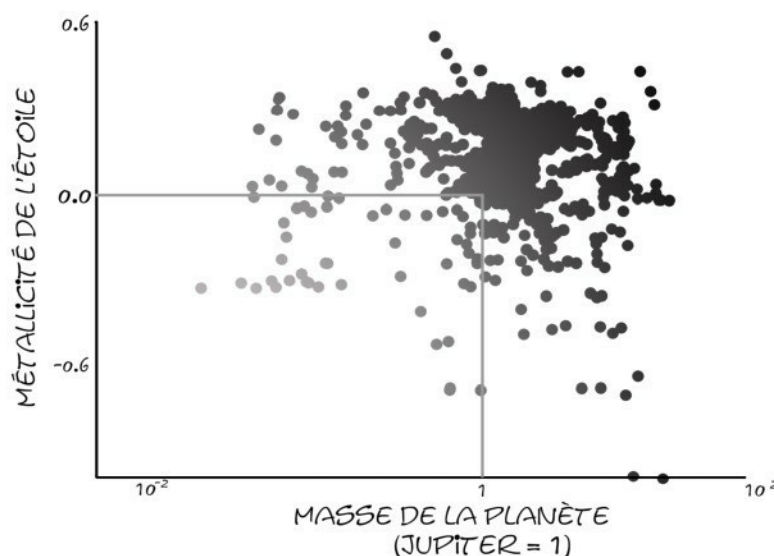
La grande majorité des planètes détectées tournent autour d'étoiles jaunes à blanches « de type solaire ». Cela s'explique assez bien : les étoiles très massives sont plus rares dans la galaxie, et seul un petit nombre d'entre elles a donc pu faire l'objet de recherches. Quant aux naines rouges, elles sont de masse plus faible, ce qui implique que les planètes qui les entourent sont sans doute moins massives elles aussi. Les naines rouges devraient donc avoir une place de plus en plus importante à l'avenir dans la recherche d'exoplanètes, avec l'amélioration des techniques de détection. De plus, les recherches ont, jusqu'à présent, naturellement privilégié les étoiles semblables au Soleil, car elles étaient jugées plus favorables à la vie : un biais observationnel supplémentaire.

Par ailleurs, nous avons vu que plus le temps passe, plus l'Univers s'enrichit en « éléments lourds » disséminés par les supernovæ : ainsi, l'âge des étoiles influe sur la probabilité d'y trouver des systèmes planétaires, qui ont besoin de ces éléments lourds (carbone, azote, oxygène, fer...). De plus, la composition en éléments lourds n'est pas uniforme dans la galaxie : à âge égal, deux étoiles nées dans deux endroits différents de la Voie Lactée peuvent donc posséder une proportion en éléments lourds différente.

C'est la « métallicité » qui mesure la proportion en éléments lourds par rapport à l'hydrogène et à l'hélium. La lumière émise par les étoiles permet d'obtenir une estimation de cette

métallicité à la surface de l'astre, ce qui peut donner une idée des chances de trouver de grosses planètes autour.

Métallicité et systèmes planétaires



Données du site
<http://exoplanet.eu/catalog.php>

La métallicité est donnée ici par rapport au Soleil : une métallicité positive indique que l'étoile possède plus d'éléments lourds que le Soleil (c'est l'inverse pour une métallicité négative). Chaque point représente une exoplanète détectée.

Quelles informations les chercheurs peuvent-ils tirer des observations actuelles sur les exoplanètes ? Les données indiquent que la métallicité moyenne des étoiles pourvues d'exoplanètes tourne autour de +0,15 : ces étoiles possèdent donc en moyenne davantage d'éléments lourds que le Soleil. Or le Soleil est un astre tout à fait « standard » : la métallicité des étoiles de la galaxie est proche de +0 en moyenne. Cela implique qu'il y a une réelle influence de la métallicité sur la formation de grosses planètes, comme on pouvait s'y attendre.

Néanmoins, cet impact de la métallicité ne semble pas critique :

des planètes de type Jupiter ont été détectées même autour d'étoiles moins « métalliques » que le Soleil. Cela confirme que la plupart des étoiles de notre galaxie sont en mesure de posséder des systèmes planétaires. C'est une très bonne nouvelle quant à la recherche d'une vie extraterrestre : le critère de métallicité est très peu contraignant, et le Soleil n'apparaît pas comme une référence particulièrement optimale.

Définition **Métallicité** : Proportion d'éléments autres que l'hydrogène et l'hélium dans un environnement donné. C'est une donnée essentielle car ces éléments lourds sont indispensables à la formation des planètes et des êtres vivants, alors qu'ils sont très minoritaires dans l'Univers (environ 2 %).

Il est temps à présent de poser notre télescope et de passer aux commandes d'un vaisseau spatial pour aller voir ces exoplanètes de plus près : nous allons embarquer pour un voyage extraordinaire !

Le système de 47 Uma : un faux jumeau du Système Solaire

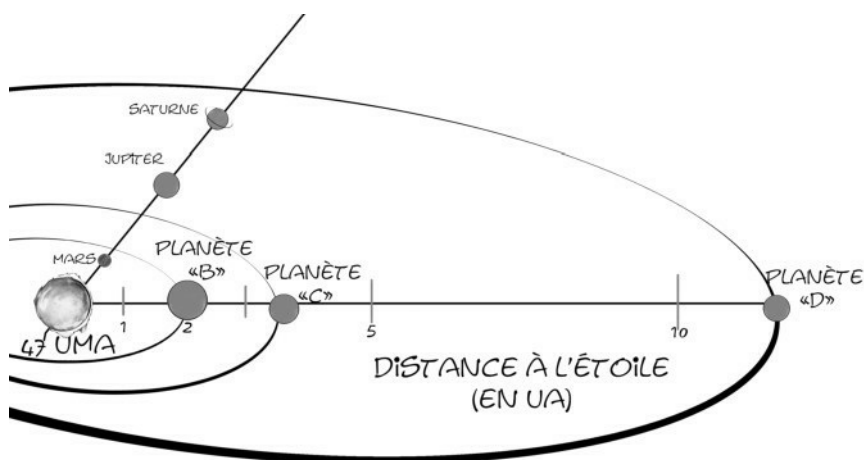
Afin de démarrer notre petit tour des exoplanètes en douceur, nous allons commencer notre périple par l'une des étoiles proches les plus similaires au Soleil : il s'agit d'une étoile à peine visible dans le ciel nocturne, celle portant le numéro 47 dans la constellation de la Grande Ourse (nous la noterons 47 Uma). Elle se trouve à 46 années-lumière de la Terre, c'est-à-dire dans notre environnement immédiat au regard des distances galactiques... C'est une étoile blanc jaune, à peine plus grosse et lumineuse que le Soleil, et de même métallicité. Elle a un âge vénérable compris entre 5,5 et 9 milliards d'années, ce qui signifie que la vie a largement eu le temps de se développer dans les zones favorables

de son système planétaire...

Trois planètes ont été détectées à ce jour, qui ressemblent toutes à Jupiter. La plus massive est au moins 2,5 fois plus lourde que Jupiter : elle est située à 2,1 UA de l'étoile, c'est-à-dire 2,1 fois la distance Terre-Soleil. Dans le Système Solaire, elle se trouverait donc entre l'orbite de Mars et la ceinture d'astéroïdes. Nous avons vu que les géantes gazeuses étaient très fréquentes dans cette région, et l'exemple de 47 Uma n'est donc pas du tout un cas particulier, même s'il se distingue du Système Solaire.

Les deux autres planètes, de masse semblable à Jupiter, se trouvent plus loin de l'étoile, à 3,6 et 11,6 UA respectivement : elles se trouvent donc dans des contrées glacées.

Le système de 47 Uma



Les 3 planètes du système de 47 Uma ont été représentées en respectant l'échelle de distance. Les planètes Mars, Jupiter et Saturne ont été ajoutées pour comparaison. Notons que 47 Uma étant un peu plus lumineuse que le Soleil, les planètes y reçoivent un peu plus d'énergie à distance égale.

Des planètes supplémentaires attendent sans doute d'être découvertes dans ce système. En particulier, on peut noter l'existence d'un curieux « vide » situé entre les planètes c et d. Or l'exemple du Système Solaire montre que toutes les orbites qui

restent stables à long terme ont tendance à être occupées. Plus précisément, le rapport de distance entre deux planètes apparaît toujours compris entre 1,4 et 2,0 : des distances plus courtes tendent à déstabiliser l'orbite, tandis que des distances plus grandes tendent à laisser de la place pour une planète supplémentaire.

Le rapport de distance entre les planètes b et c est de 1,7 : aucune planète ne se cache donc entre les deux. En revanche, le rapport de distance entre les planètes c et d est de 3,2 : c'est exactement ce qu'il faut pour laisser la place à une planète supplémentaire. Cette « planète e » hypothétique doit se trouver vers 6,5 UA (ce qui donne des rapports de distance cohérents, égaux à 1,8).

La masse de cette « planète e » est sans doute inférieure à celle de Jupiter, puisqu'elle n'a pas encore été découverte. Mais il doit s'agir d'une géante gazeuse au vu de sa position parmi les autres planètes : peut-être ressemble-t-elle à Saturne ?

Par ailleurs, il est vraisemblable que d'autres planètes se trouvent au-delà de la planète d, vers les contrées obscures de l'espace, à l'instar d'Uranus et de Neptune. On aura noté que la masse totale des planètes du système de 47 Uma dépasse largement celle des planètes du Système Solaire : c'est un constat surprenant dans le sens où il s'agit d'une étoile similaire au Soleil, et de même métallicité. Cet exemple montre qu'il faut s'attendre à une très grande variété de situations au sein de la galaxie...

En revanche, les régions plus proches de 47 Uma pourraient être pauvres en planètes, car la présence de la « planète b », très massive, pourrait avoir gêné leur formation : ainsi dans le Système Solaire, la présence de Jupiter a-t-elle empêché la formation d'une planète au niveau de la ceinture d'astéroïdes. Il n'est donc pas du tout certain qu'une planète semblable à la Terre puisse se trouver dans la « zone habitable », c'est-à-dire vers 1 UA de distance à l'étoile.

Les orbites d'un système planétaire

Les planètes s'influencent entre elles de façon gravitationnelle, cela tend à perturber leurs orbites, de telle sorte qu'il devient impossible de prédire leur position future sur le très long terme. À cause de ces interactions, beaucoup d'orbites ne sont pas stables à l'échelle de vie d'un système planétaire. Ainsi en pratique, la matière présente dans la nébuleuse initiale ne subsiste que sur un nombre limité d'orbites stables, sous la forme de planètes. Ces orbites sont régulièrement réparties : le tableau ci-dessous indique le rapport de distance entre les différentes planètes du Système Solaire, comparé à celui du système de 47 Uma.

Système Solaire	Système de 47 Uma
Mercure – Vénus : 1,8	Planète b – Planète c : 1,7
Vénus – Terre : 1,4	Planète c – Planète d : 3,2
Terre – Mars : 1,5	
Mars – Jupiter : 3,4	
Jupiter – Saturne : 1,8	
Saturne – Uranus : 2,0	
Uranus – Neptune : 1,6	

Dans le Système Solaire, la distance entre Mars et Jupiter n'est pas conforme au rapport attendu : cela laisse une orbite stable disponible entre les deux. Or c'est précisément à ce niveau qu'est centrée la ceinture d'astéroïdes : seule la masse énorme de Jupiter a empêché l'accrétion d'une planète à cet endroit.

De même dans le système de 47 Uma, il existe une « lacune » similaire. À cet endroit éloigné de l'étoile, les planètes sont très distantes entre elles : la lacune n'abrite donc sans doute pas une ceinture d'astéroïdes, mais bien une géante gazeuse.

Mars – Ceinture d'astéroïdes : 1,8	Planète c – Lacune : 1,8
Ceinture d'astéroïdes – Jupiter : 1,9	Lacune – Planète d : 1,8

Cette existence d'orbites stables apparaît comme un excellent moyen de prédire l'existence de planètes encore non découvertes. Mais au vu des connaissances actuelles, il faut préciser que cet outil doit être utilisé avec beaucoup de précaution...

De la vie sur 47 Uma ?

Est-ce la fin de nos espoirs pour dénicher la vie dans ce système ? Ne baissons pas les bras trop vite et approchons-nous de la grosse planète b. À n'en pas douter, celle-ci doit posséder une myriade de satellites, à l'instar des géantes gazeuses du Système Solaire. Or, contrairement à Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, elle se trouve dans la zone favorable à l'eau liquide...

Il y a alors trois cas de figure possibles :

Première possibilité : tous ses satellites sont trop petits pour avoir pu retenir une atmosphère. Il s'agit alors sans doute de corps rocheux desséchés comparables à la Lune.

Deuxième possibilité : certains de ces satellites sont d'une taille et d'une masse approchant celle de Mars (soit au moins 6 000 km de diamètre). C'est une hypothèse qui peut sembler osée, car dans le Système Solaire, tous les satellites sont beaucoup plus légers : le plus gros d'entre eux, Ganymède, fait 77 % de la taille de Mars, mais seulement 23 % de sa masse...

Ce serait oublier que notre « planète b » est 2,5 fois plus massive que Jupiter, ce qui montre qu'il y avait une très grande quantité d'éléments lourds disponibles dans la région : l'idée que des satellites massifs puissent évoluer autour ne paraît donc pas

absurde.

Un gros satellite pourrait alors posséder une atmosphère de dioxyde de carbone (ce gaz lourd ne s'échappe pas facilement). Son énergie radioactive interne resterait sans doute trop faible pour alimenter le volcanisme. Mais pour peu qu'un autre satellite le perturbe au cours de sa trajectoire, il pourrait subir un malaxage important par effet de marée (à l'instar du satellite Io). Un tel satellite connaîtrait dans ce cas une activité volcanique régulière éjectant du dioxyde de carbone.

Toutes les conditions seraient ainsi en place pour maintenir des océans d'eau liquide en surface ! Étant donné l'éloignement de l'étoile, il s'agirait d'un monde plutôt froid possédant des calottes polaires très développées, et doté d'une atmosphère épaisse de dioxyde de carbone imposant un effet de serre très intense. Toutes les bases indispensables à la vie seraient présentes...

Carte d'identité du monde imaginaire de 47 Uma b

Toutes les valeurs sont indiquées par rapport à la Terre.

- Diamètre : $\times 1/2$
- Masse : $\times 1/10$
- Gravité à la surface : $\times 1/3$
- Luminosité diurne : $\times 1/3$
- Durée du jour : $\times 3$
- Durée de l'année : $\times 3$
- Pression de surface : $\times 10$? (dioxyde de carbone majoritaire)
- Température moyenne : $- 5\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Troisième possibilité : un satellite légèrement plus gros que Mars. Dans ce cas, c'est non seulement le dioxyde de carbone qui pourrait se maintenir dans l'atmosphère, mais aussi le diazote (d'autant que le champ magnétique de la géante gazeuse protège le satellite de l'érosion). Il n'y a alors plus besoin de mettre en jeu

un malaxage par effet de marée pour que cette atmosphère se maintienne en place (contrairement au dioxyde de carbone, le diazote ne réagit pas dans l'eau pour former des carbonates).

Visite d'un monde haut en couleurs

Mettons-nous donc en orbite autour de la planète b et prenons place dans un module pour atterrir sur le plus gros de ses satellites. Avant de sortir, il va falloir se vêtir d'une bonne doudoune... Pas de masque ni de combinaison nécessaires en revanche : la vie a créé le dioxygène nécessaire pour la respiration, tandis que l'atmosphère dense nous protège des radiations nocives de l'étoile 47 Uma.

Nous nous sentons déjà plus légers : ici la gravité est trois fois plus faible que sur Terre. Cela nous donne des ailes, et nous ouvrons la porte du module : quel spectacle ! Une rivière s'écoule non loin de là, au cœur d'une végétation bien verte : elle descend de montagnes majestueuses dotées de vastes glaciers. Sur ce monde, la tectonique des plaques est possible grâce au malaxage par effet de marées et à la présence d'eau liquide : la faible gravité conduit à des chaînes montagneuses bien plus élevées que sur Terre... Pour couronner le tout, un volcan est en éruption au cœur du massif : il se charge d'expulser le trop-plein d'énergie interne.

De l'autre côté, la rivière vient se perdre dans la mer : c'est marée haute. Dans quelques heures, la mer se sera retirée loin vers l'horizon : en effet, l'influence du deuxième satellite responsable du malaxage nous aura légèrement éloignés de la planète... La plaine face à nous se transformera alors en une immense étendue désertique. Mais l'eau finira par revenir... plus vite qu'un cheval au galop !

Levons maintenant les yeux vers le ciel : l'étoile 47 Uma s'apprête à se coucher. Elle apparaît presque deux fois plus petite que le

Soleil vu de la Terre. Sa lumière parvient à transpercer une couche de brume uniforme de haute altitude : la densité considérable de l'atmosphère favorise la formation de certaines espèces chimiques en suspension qui la rendent partiellement opaque.

Le coucher de soleil est interminable, car ici les journées sont trois fois plus longues que sur Terre : il faut que le satellite fasse tout le tour de la planète pour que s'écoule un cycle jour-nuit.

La tombée de la nuit va permettre de mieux comprendre ce qui se passe : dans le ciel nocturne, transperçant les brumes, trône la géante gazeuse, énorme. On ne peut pas la rater, car elle est 40 fois plus grande que la pleine Lune vue de la Terre, et occupe toute une partie du ciel... Elle apparaît parfaitement immobile, car notre monde lui tourne toujours la même face. En revanche, ses phases évoluent rapidement à mesure que la nuit s'écoule : d'abord à moitié éclairée en début de nuit (premier quartier), elle deviendra pleine exactement en milieu de nuit, avant de redevenir un dernier quartier à l'aube.

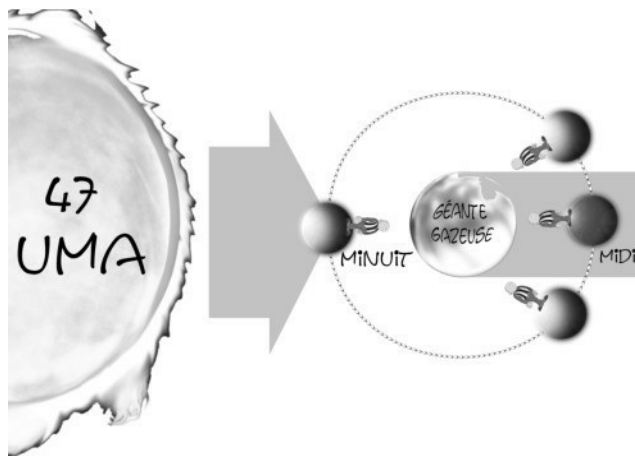
Supposons que la géante gazeuse possède en plus de vastes anneaux bien marqués, à l'instar de Saturne : nous avons alors l'impression de pouvoir presque les toucher, tant ils paraissent proches. De jour comme de nuit, cela constitue un spectacle inoubliable, sans comparaison avec celui de notre petite Lune !

Ainsi les nuits sur ce monde sont loin d'être noires, grâce au puissant et permanent « clair de lune ». Cela ne concerne toutefois que l'un des deux hémisphères du satellite : l'autre hémisphère est en permanence tourné « vers l'extérieur », et ne voit donc jamais la planète : il doit se contenter du ballet des croissants de lune qui tournent avec nous autour de la géante...

Revenons du « bon côté » du satellite : pendant la journée, la planète devient un fin croissant, qui se réduit jusqu'à « s'éteindre » à midi. En effet, lorsque notre hémisphère fait face à l'étoile, cela

veut dire qu'il fait face au côté non éclairé de la planète.

Éclipses et « clairs de lune »



La personne représentée indique notre position : le satellite présente toujours la même face vers la géante gazeuse, ce qui implique que nous la voyons au zénith à toute heure.

À minuit, nous faisons face au côté éclairé de la planète. À midi, nous faisons face au côté sombre. De plus, la planète masque la lumière de l'étoile à cet instant : c'est une « éclipse de soleil ». Ainsi un épisode nocturne apparaît-il en milieu de journée !

De plus, les « éclipses de soleil » sont quotidiennes au moment des équinoxes ! En effet, à midi la géante gazeuse se retrouve systématiquement en plein devant l'astre du jour... Ces éclipses peuvent même durer plusieurs heures, au vu des dimensions de la planète dans le ciel ! Autant dire qu'il s'agit d'une véritable « petite nuit » au cœur du jour : l'obscurité est même plus grande que pendant la « grande nuit », puisqu'il n'y a plus de « clair de lune » à cet instant ! Notons que sur l'autre hémisphère du satellite en revanche, il n'y a jamais d'éclipse puisqu'il n'y a pas de planète dans le ciel pour cacher le soleil.

Si l'axe de la planète est très incliné, alors ce phénomène d'éclipse n'a lieu qu'autour des équinoxes ; par ailleurs, cela implique que ce monde subit des saisons comparables aux saisons terrestres.

Dans le cas contraire, le phénomène d'éclipse a lieu chaque jour toute l'année (qui dure presque trois ans terrestres), tandis que les saisons sont inexistantes.

La Sibérie au crépuscule

Soyons consciencieux : avant de quitter le système de 47 Uma, il s'agit de vérifier que nous n'avons pas mis de côté d'autre planète abritant la vie... Nous avons vu que l'existence d'une planète comparable à la Terre n'était pas garantie, du fait de la proximité de la géante gazeuse que nous venons de quitter. Allons plutôt faire un tour vers les régions glacées où se situe la planète d : elle se trouve à 11,6 UA de l'étoile, c'est-à-dire légèrement plus loin que Saturne du Soleil. Il s'agit d'ailleurs de la planète la plus éloignée de son étoile parmi les 500 exoplanètes découvertes à ce jour...

Il existe sans doute tout un ensemble de satellites autour de cette planète. La plupart d'entre eux doivent être couverts de glace ; mais peut-être le phénomène des marées peut-il être utile à la vie ici aussi, en donnant son énergie à certains satellites ?

Approchons-nous donc du plus gros d'entre eux, et supposons qu'il subisse effectivement un malaxage par effet de marées. Nous allons estimer qu'il mesure 5 000 km de diamètre, le même diamètre que Titan. Il est alors permis d'imaginer un monde bien différent de ces boules de glace omniprésentes dans la région...

Ici la surface est recouverte par une atmosphère lourde, plus dense que celle de la Terre : elle est principalement constituée de diazote, associé à d'autres espèces plus minoritaires (notamment le méthane). Des mouvements de convection l'agitent à sa base, et parfois des éclairs la strient. Un peu partout, trouant le sol glacé, se trouvent de vastes mers d'eau liquide. D'épais nuages d'ammoniac mélangé à un peu d'eau couvrent une grande partie

du ciel. Les continents formés de glace d'eau reçoivent des pluies diluviennes de ce liquide, qui forme des lacs et des rivières parcourant la surface. Hélas, si l'atmosphère contient trop de méthane, cela signifie qu'elle est probablement opaque (à l'instar de Titan) : dans ce cas, aucune région ne peut connaître de véritables journées « ensoleillées »...

Sur ces continents, la glace craque de toutes parts, et des montagnes se forment et s'érodent au gré des mouvements de l'eau liquide sur laquelle les continents reposent, tels de gigantesques icebergs. Certaines rivières s'évaporent avant d'atteindre l'océan, tout en laissant des dépôts de glace qui modifient sans relâche leur cheminement. Et quand elles parviennent jusqu'à l'océan, la mer semble bouillonner sous leurs assauts.

Pourtant, la surface reste sans vie. Il faut s'enfoncer au fond des océans, à des centaines de kilomètres de profondeur, pour la rencontrer : là des volcans libèrent une énergie considérable, et expliquent le spectacle qui nous était offert à la surface. C'est dans cette soupe bouillonnante autour des volcans que se cache peut-être une vie microscopique, primitive. Pas de monstres marins dans ces eaux obscures : ici l'étoile n'a guère pu donner son énergie pour qu'ils se développent.

Même en surface, les journées sont près de cent fois moins lumineuses que sur Terre, du fait de l'éloignement de l'étoile. Et si l'atmosphère est totalement opaque, alors cela signifie que ce monde vit un éternel et sombre crépuscule...

Méthane ou dioxyde de carbone ?

Dans la zone externe du Système Solaire (géantes gazeuses et leurs satellites), l'élément carbone est principalement lié à de l'hydrogène pour former le méthane CH_4 : le méthane forme une part non négligeable de l'atmosphère de Titan, mais aussi d'Uranus et de Neptune. Dans la zone

interne (planètes telluriques), le carbone est lié à l'oxygène pour former le dioxyde de carbone CO_2 : le dioxyde de carbone est l'espèce principale des atmosphères de Vénus et de Mars. D'où vient cette différence ?

En fait, cette distinction est liée à l'abondance de l'eau : dans la zone interne, les rayonnements ont empêché l'eau H_2O de se former en grande quantité (y compris sur Terre, où l'eau forme une fraction totalement négligeable de la masse totale). L'hydrogène, léger, s'est échappé, tandis que l'oxygène, plus lourd, a pu s'accumuler sur la planète : le ratio oxygène/hydrogène est élevé, et le carbone s'est naturellement combiné à l'oxygène pour former du dioxyde de carbone CO_2 .

À l'inverse, dans la zone externe, l'hydrogène est très abondant car les rayonnements y sont restés trop faibles pour l'expulser (rappelons-nous aussi qu'il s'agit de l'élément le plus abondant dans l'Univers) : il a pu non seulement se lier à de l'oxygène pour former de l'eau H_2O , mais aussi à du carbone pour former le méthane CH_4 .

Il se trouve que le méthane et le dioxyde de carbone sont deux gaz à effet de serre : ces gaz contribuent donc tous les deux à réchauffer la surface du corps. En revanche, il existe une différence fondamentale au niveau des propriétés chimiques : le dioxyde de carbone est une espèce plutôt « oxydante », tandis que le méthane est une espèce plutôt « réductrice ».

Ainsi, les atmosphères des planètes telluriques sont beaucoup plus oxydantes que celles des satellites externes. Or le meilleur des oxydants est le dioxygène O_2 : cela implique que l'accumulation de dioxygène sur un satellite glacé des géantes gazeuses est impossible, car il serait détruit par l'environnement réducteur. À l'inverse, il a pu s'accumuler sur Terre car il a bénéficié d'un environnement qui était nettement plus oxydant dès les origines...

Notons enfin une conclusion similaire au sujet de l'élément azote : s'il forme préférentiellement du diazote N_2 quel que soit l'environnement (les atmosphères de Titan comme de la Terre sont constituées majoritairement de diazote), il peut aussi se combiner à d'autres atomes. Dans la zone des planètes telluriques, il formera plutôt du dioxyde d'azote NO_2 , tandis que dans la zone des géantes gazeuses il formera de l'ammoniac NH_3 .

Un type d'environnement commun dans la galaxie ?

Ce monde exotique, il est sans doute inutile d'aller très loin pour

le rencontrer : peut-être même aurait-il pu exister dans le Système Solaire, si Jupiter et Saturne avaient échangé leurs positions, avec leur cortège de satellites...

En effet, le satellite Ganymède de Jupiter et le satellite Titan de Saturne sont deux frères jumeaux : même masse, même composition, distance comparable à la planète, n'autorisant pas un malaxage intense par les forces de marée. Pourtant, Titan est recouvert d'une épaisse atmosphère de diazote, alors que Ganymède n'en a aucune : cela montre que la plus grande « proximité » de Ganymède au Soleil par rapport à Titan a sans doute joué un rôle dans l'évolution divergente de ces deux satellites. Si les ultraviolets du Soleil ont arraché l'azote de l'atmosphère de Ganymède, mettant ce corps à nu, ils n'ont pas été suffisamment puissants sur Titan pour le faire.

Que se passe-t-il alors quand on ajoute un malaxage par effet de marées, comme proposé dans notre monde imaginaire ? Sur Io et sur Europe (satellites de Jupiter), ce malaxage a été suffisant pour que l'eau initialement glacée change d'état : faute d'atmosphère (arrachée par les UV solaires), cette eau est passée directement sous forme de vapeur (la pression fatidique des 6 mbar n'était pas atteinte). Elle a alors elle-même subi le bombardement des ultraviolets du Soleil, qui a éjecté l'eau du satellite comme il l'avait fait de l'azote.

Que se serait-il passé si ces satellites s'étaient trouvés plus loin dans le Système Solaire, au niveau de l'orbite de Saturne ? Le diazote aurait été préservé dans l'atmosphère, maintenant une pression supérieure à 6 mbar : ainsi l'eau chauffée serait passée à l'état liquide et non plus à l'état gazeux. Cela l'aurait préservée des UV solaires, incapables de traverser l'atmosphère de diazote : l'eau serait restée intacte jusqu'à aujourd'hui, donnant le spectacle d'une surface mélangeant des mers d'eau liquide à des continents de glace.

Au vu de l'importante réserve de glace de Ganymède, Callisto ou Titan, la profondeur des océans aurait été de plusieurs centaines de kilomètres : la roche constellée de volcans dus au malaxage aurait été dissimulée bien loin sous la surface. Ce n'est qu'à cet endroit que l'énergie aurait été assez grande pour faire émerger une vie hypothétique. L'absence de rayonnement aurait sans doute fortement limité son développement, et aurait probablement interdit toute forme de vie macroscopique.

De l'eau liquide à moins de 0 °C

Il n'est pas toujours nécessaire de dépasser les 0 °C pour qu'il y ait de l'eau liquide : en effet, cette valeur n'est valable que pour de l'eau pure, ce qui est rarement le cas dans l'Univers. Ne serait-ce que sur Terre, les océans sont constitués d'eau salée (présence d'ions chlorure et sodium notamment), ce qui empêche les mers de geler lorsque la température atteint 0 °C. En quelque sorte, le sel dissous sert « d'antigel ».

Sur un satellite comme Europe, c'est sans doute l'ammoniac qui joue le rôle de principal antigel : cela permet à un océan sous-glaciaire d'exister, même si les températures restent très négatives.

De même, sur notre monde imaginaire, l'ammoniac doit jouer un grand rôle. On peut imaginer des températures de – 20 °C à – 10 °C au-dessus des mers, grâce au chauffage des volcans présents loin sous la surface, et de – 40 °C au-dessus des continents de glace. L'ammoniac pur est alors à l'état gazeux dans les régions chaudes, et liquide dans les régions froides, ce qui doit conduire à un « cycle de l'ammoniac » similaire au « cycle de l'eau » sur Terre. Un tel monde verrait ainsi la présence de deux liquides distincts, l'eau formant les océans et l'ammoniac formant des lacs sur les continents. Plus précisément, il s'agirait en général d'un mélange de ces deux espèces.

La vie en rouge : le système de Gliese 581

Afin de poursuivre notre périple vers des contrées très différentes de celles que nous venons de quitter, nous allons à présent partir à

la recherche d'une planète tellurique. La tâche n'est pas facile, puisque presque toutes les exoplanètes connues à ce jour sont des géantes gazeuses ! De plus, les rares planètes telluriques découvertes sont en général situées très près de leur étoile (c'est ce qui explique qu'on ait pu les détecter) : il s'agit donc de corps desséchés et sans vie...

Mais le 29 septembre 2010, des astronomes ont annoncé la découverte d'une planète tellurique située sur une orbite de type terrestre^[2] : c'est une véritable révolution, car cette planète devient le corps connu le plus susceptible d'abriter la vie ailleurs que sur Terre !

Cette planète évolue autour d'une naine rouge, ce qui n'est pas un hasard : les naines rouges étant de faible masse, elles sont davantage perturbées par leurs planètes, ce qui permet de les détecter plus facilement. À l'avenir, les naines rouges pourraient donc devenir les meilleures candidates dans la recherche de planètes telluriques.

Pour découvrir cette mystérieuse planète, il nous faut faire cap sur la naine rouge répondant au doux nom de « Gliese 581 », située à 20,5 années-lumière de la Terre. Cette étoile ne mesure qu'un tiers de la taille du Soleil, et dégage cent fois moins d'énergie. Cette impression d'astre « faiblard » est encore accentuée par le fait qu'une partie de cette énergie est émise dans l'infrarouge : la lumière visible, très rouge, est d'autant moins intense !

Pour découvrir des planètes « habitables », il faut nous approcher bien davantage de l'étoile par rapport à la distance Terre-Soleil, qui nous paraissait tellement optimale : au vu de la faible luminosité de la naine rouge, une telle distance ne pourrait abriter que des mondes glacés et probablement sans vie. Allons donc dix fois plus près de l'étoile : au moins six planètes se partagent la région.

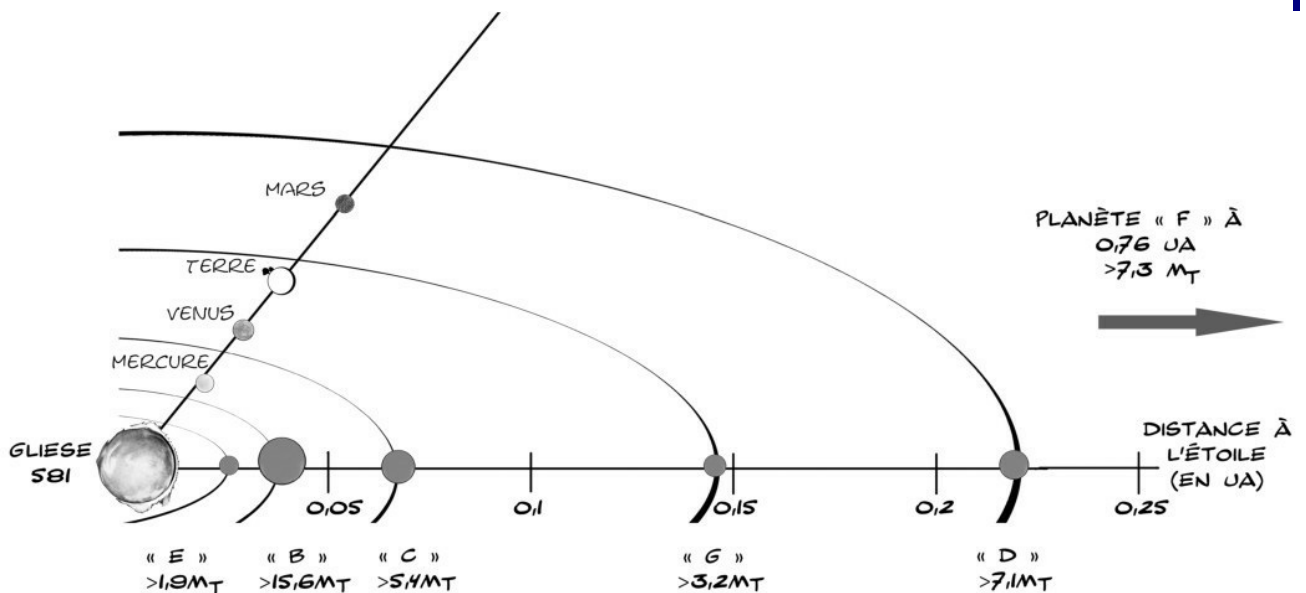
La plus proche de l'étoile pèse seulement deux fois la masse de la

Terre : c'est l'une des plus petites planètes connues à ce jour. Mais elle se trouve tellement près de la naine rouge qu'elle est complètement « grillée » par ses rayonnements : il est vraisemblable qu'elle ne possède ni atmosphère, ni eau à sa surface.

Elle ne ressemble pas pour autant à Mercure ou à la Lune, car sa masse élevée implique l'existence possible d'une forte activité interne. En l'absence d'eau, celle-ci doit se manifester en surface par un volcanisme « de point chaud », c'est-à-dire par d'énormes volcans mais peu de chaînes montagneuses. Dans tous les cas, il s'agit à n'en pas douter d'un monde totalement hostile, où le rouge omniprésent de l'étoile se combine au rouge de la lave en fusion au milieu d'une fournaise insupportable : une matérialisation de l'enfer, en quelque sorte...

La planète suivante reçoit à peu près les mêmes rayonnements que Mercure. Elle pèse au moins 16 fois la Terre, à l'instar d'Uranus ou de Neptune. Enfin, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'étoile, on rencontre quatre planètes (plus peut-être une cinquième qui reste à détecter) dont les masses sont comprises entre 3 et 7,3 masses terrestres : la plus proche reçoit les mêmes rayonnements que Vénus, la plus éloignée reçoit les mêmes rayonnements que Jupiter. Les autres se trouvent donc dans la zone optimale « d'habitabilité ». En particulier, la moins massive est aussi celle qui reçoit la même quantité de rayonnements que la Terre : c'est elle qui constitue notre meilleure candidate à la vie parmi les 500 exoplanètes découvertes à ce jour...

Le système de Gliese 581



Nous avons représenté page suivante cinq des six planètes détectées autour de Gliese 581, en respectant les échelles de distance (la sixième est sensiblement plus éloignée de l'étoile). Nous avons ajouté les planètes telluriques du Système Solaire, conformément au flux de rayonnement reçu : on voit que la « planète g » reçoit à peu près la même énergie que la Terre.

Les masses sont indiquées par rapport à celle de la Terre (notée M_T). Il ne s'agit que d'une limite inférieure, en raison de la technique de détection utilisée. La masse réelle dépend de l'inclinaison du système planétaire par rapport à la ligne de visée : à titre d'exemple, si on imagine une inclinaison « médiane » de 45° , il faut multiplier les valeurs de masse indiquées par 1,4.

Les rapports de distance entre les planètes du système de Gliese 581 sont les suivants :

- Planète e – Planète b : 1,3
- Planète b – Planète c : 1,75
- Planète c – Planète g : 2,1
- Planète g – Planète d : 1,5
- **Planète d – Planète f : 3,4**

On voit qu'il apparaît une lacune très nette entre les planètes d et f, ce qui laisse supposer l'existence d'une planète supplémentaire à ce niveau :

- Planète d – Lacune : 1,85
- Lacune – Planète f : 1,85

Par ailleurs, si on peut suspecter l'existence d'une cinquième planète dans cette zone, c'est à cause de l'existence d'une lacune parmi les différentes orbites observées. Comme aucune géante gazeuse de type Jupiter n'existe dans le secteur, cela laisse entendre qu'une planète a peut-être pu s'y former. Elle est probablement assez peu massive, puisqu'elle n'a pas encore été détectée : il suffirait qu'elle pèse 3 fois la Terre pour avoir échappé aux observations.

Toutes ces planètes dont la masse est comprise entre 3 et 7 fois la Terre appartiennent à une classe inconnue dans le Système Solaire, intermédiaire entre la « planète tellurique » et la « géante gazeuse ». Cela implique qu'il est difficile de savoir à quoi elles pourraient ressembler...

En fait, il existe deux grands scénarios possibles, desquels dépend l'aspect de ces planètes. C'est la présence de la planète b de 15 masses terrestres qui nous invite à les envisager. Celle-ci soulève en effet des interrogations, puisqu'elle a la masse de Neptune tout en étant à la position de Mercure. Voici les deux hypothèses possibles pour résoudre cette « bizarrerie » :

- Ou bien la planète b s'est formée sur place, ce qui implique qu'elle ne contient pas beaucoup d'eau, et que son atmosphère est sans doute principalement constituée de diazote et de dioxyde de carbone. Dans ce cas, il s'agit d'un corps essentiellement rocheux (fer, silicates). C'est une hypothèse troublante, car cela implique qu'il devait y avoir une quantité gigantesque d'éléments lourds dans le voisinage immédiat de l'étoile.
- Ou bien la planète b s'est formée beaucoup plus loin de l'étoile et a ensuite migré vers l'intérieur. Dans ce cas elle pourrait avoir conservé une grande quantité d'eau sous une

atmosphère extrêmement épaisse, expliquant sa forte masse. Le problème est que toutes les autres planètes plus externes seraient originaires de la région des géantes gazeuses, elles aussi : leur faible masse apparaîtrait alors surprenante.

Pour résumer, dans le premier scénario c'est la forte masse de la planète b qui est surprenante. Dans le deuxième scénario, c'est la faible masse des autres planètes plus externes qui pose problème...

Nous allons maintenant nous approcher de la planète g, la plus semblable à la Terre, pour voir à quoi pourraient ressembler ses paysages dans chacun des deux scénarios. Nous allons commencer par le premier scénario : toutes les planètes se sont formées à l'endroit où elles se trouvent aujourd'hui.

Un jour perpétuel

Au moment de nous mettre en orbite autour de la planète, nous pouvons déjà faire un constat d'une grande importance : la surface laisse apparaître des continents et des océans comme sur Terre. Cette vision reste assez floue, car l'atmosphère épaisse tend à noyer les détails : la pression de diazote à la surface est presque deux fois plus élevée que sur notre planète. À cela s'ajoute du dioxygène créé par la vie, en plus grande quantité que sur Terre, et un peu de dioxyde de carbone. Enfin, de vastes nuages d'eau masquent une partie de la surface.

La pression supérieure à celle de la Terre ne pose aucun problème pour notre organisme. En revanche, notre squelette risque de souffrir quelque peu : une personne de 60 kg pèse presque 100 kg sur cette planète !

De plus, le fait qu'elle se trouve en orbite autour d'une naine rouge entraîne une autre différence majeure : pour recevoir autant

d'énergie que la Terre, il a fallu qu'elle soit sept fois plus proche de son étoile. Il s'ensuit qu'elle subit de plein fouet les forces de marée exercées par l'astre.

Deux cas de figure sont alors envisageables : ou bien l'orbite de la planète est circulaire, ou bien elle est elliptique. Les observations actuelles ne permettent pas de trancher : selon le cas considéré, la vie pourrait avoir pris des formes bien différentes...

Imaginons d'abord que l'orbite de la planète soit parfaitement circulaire, c'est-à-dire que la planète reste toujours à la même distance de l'étoile. Dans ce cas, du fait des forces de marée, elle oriente toujours la même face vers la naine rouge. Ainsi, depuis l'un des hémisphères, l'étoile est définitivement invisible et la nuit est permanente. Depuis l'autre, l'étoile apparaît fixe dans le ciel, sous la forme d'un énorme globe rouge deux fois et demie plus gros que le Soleil vu de la Terre : il s'agit d'un jour perpétuel...

Carte d'identité de la planète Gliese 581 g

Toutes les valeurs sont indiquées par rapport à la Terre.

- Diamètre : $\times 1,4$
- Masse : $\times 3,2$
- Gravité à la surface : $\times 1,6$
- Luminosité diurne : $\times 0,6$
- Durée du jour : infinie sur un hémisphère, nulle sur l'autre
- Durée de l'année : sans effet (absence de saison)
- Pression de surface : $\times 2$? (diazote majoritaire)
- Température moyenne : $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ côté jour, $- 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ côté nuit ?

Nous tenons là des conditions a priori idéales pour l'émergence de la vie : du côté jour, l'énergie fournie par l'étoile est stable et intense, favorisant les réactions chimiques complexes dans les eaux peu profondes. Cette énergie était intermittente sur Terre, avant que le dioxygène ne s'accumule : la vie autour de la naine

rouge semble donc avoir des conditions de développement bien plus idéales.

De plus, elle y possède un deuxième atout : sur Terre, les ultraviolets ont imposé pendant longtemps à la vie de rester en profondeur sous l'eau. Or sur la planète g en orbite circulaire, il existe une région qui est protégée en permanence de ces ultraviolets, tout en bénéficiant partiellement de la lumière de l'étoile : il s'agit de « l'anneau crépusculaire » qui fait tout le tour de la planète, et qui délimite le côté jour et le côté nuit.

Ainsi, après avoir émergé sous l'eau du côté jour, la vie a peut-être colonisé en priorité ces régions limitrophes pour y connaître un nouveau développement, y compris sur les terres émergées. Sur une telle planète, la vie disposerait dès le début des conditions qui ont mis quatre milliards d'années à apparaître sur Terre : une source permanente d'énergie (qu'a constituée le dioxygène sur Terre au bout de 2,5 milliards d'années), et un bouclier vis-à-vis des UV nocifs (qu'a constitué l'ozone sur Terre au bout de 4 milliards d'années). Finalement, une vie intelligente autour d'une naine rouge n'a peut-être besoin que de quelques centaines de millions d'années pour se développer, contre 4 milliards d'années sur Terre...

À quoi pourrait ressembler l'écosystème sur une telle planète ? Il existe assurément deux hémisphères totalement dissemblables :

Du côté jour, la flore doit être particulièrement exubérante. Pourrait-il exister de même des animaux sans nez et sans poumon, basés uniquement sur l'exploitation de l'énergie solaire ? Si c'est le cas, ils doivent nécessairement posséder des structures possédant une très grande surface déployée, afin de capter la lumière solaire : on peut penser à des crêtes dorsales, ou encore à des ailes qui pourraient accessoirement servir à voler... Il est toutefois peu probable que cela suffise pour assurer les besoins énormes en énergie d'un animal.

Du côté nuit au contraire, l'absence permanente de lumière doit probablement en faire un hémisphère dénué de vie. On peut tout au plus envisager une faune et une flore très locales, concentrées près de sources hydrothermales... Le côté nuit possède un seul atout : il est protégé des radiations nocives de l'étoile. C'est la raison pour laquelle « l'anneau crépusculaire », qui forme la transition entre le côté jour et le côté nuit, est particulièrement intéressant pour le développement de la vie.

Selon la quantité d'éléments radioactifs à l'intérieur de la planète, son activité volcanique pourrait être bien différente. Si cette activité est trop intense, cela pourrait empêcher l'accumulation de dioxygène et d'ozone dans l'atmosphère. La vie du côté jour serait alors très difficile, en raison des radiations nocives de l'étoile : auquel cas, elle resterait peut-être concentrée autour de l'anneau crépusculaire. Cela serait une curieuse vision que celle de cet « anneau de verdure » séparant deux hémisphères totalement désertiques !

Disons enfin un mot sur le climat d'une telle planète : la différence de température entre le côté jour et le côté nuit est sans doute très importante. La planète doit alors subir des vents violents chargés de répartir l'énergie entre les deux hémisphères.

D'autre part, l'eau s'évapore sans doute en masse du côté jour, avant d'y retomber en pluie. Du côté nuit, les pluies et neiges diminuent probablement d'intensité à mesure qu'on s'éloigne de l'anneau crépusculaire, jusqu'à y disparaître presque complètement là où il fait nuit noire : le soleil n'étant jamais là pour évaporer l'eau, l'air doit y rester très sec, même au-dessus des océans. Par ailleurs, la majorité de l'hémisphère est probablement recouvert de glace. Cela renforce à nouveau le caractère hostile à la vie de cet hémisphère nocturne...

Enfin, le cycle de l'eau doit connaître une spécificité importante

sur cette planète : comme l'eau se dépose sous forme de glace du côté nuit, cela signifie qu'elle ne peut pas s'y écouler facilement. L'eau évaporée du côté jour tend ainsi à s'accumuler du côté nuit : finit-elle alors par passer intégralement sous forme de glace à cause de ce flux à sens unique ? Cela sonnerait la fin des espoirs pour le développement de la vie, faute d'eau liquide...

En fait, une fois que la calotte glaciaire du côté nuit devient suffisamment épaisse, elle doit « s'écouler » très lentement vers les régions libres de glace, plus basses, situées près de l'anneau crépusculaire (de même que les glaciers sur Terre « s'écoulent » vers le bas, bien qu'ils soient solides). L'eau peut alors y repasser à l'état liquide, alimentant ainsi les océans du côté jour par le biais de cet anneau crépusculaire : le cycle de l'eau est bouclé, à la grande satisfaction de la vie !

Vénus, une planète aux journées interminables...

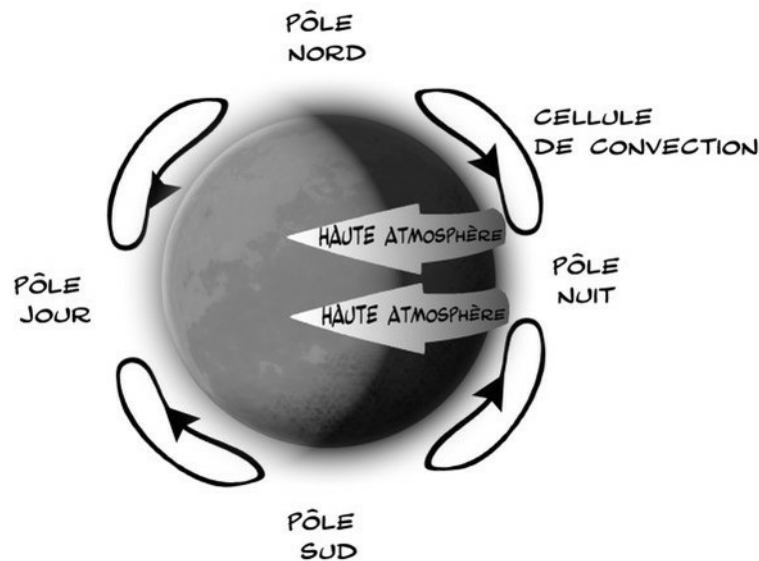
Vénus possède une rotation très lente sur elle-même (et rétrograde par rapport à sa révolution autour du Soleil) : une journée vénusienne dure environ 117 jours terrestres... La circulation de son atmosphère donne donc une idée de ce qui pourrait se produire sur une planète présentant toujours la même face vers son étoile.

La principale caractéristique de la haute atmosphère de Vénus est qu'elle fait le tour de la planète en seulement 4 jours terrestres : tout se passe donc comme si une journée durait 4 jours dans l'atmosphère, au lieu des 117 jours à la surface. Cette propriété permet de redistribuer efficacement l'énergie entre le côté jour et le côté nuit, comme si la planète connaissait un cycle jour-nuit de 4 jours.

La vitesse des vents est beaucoup plus lente à proximité du sol, à cause de la friction qu'exerce le sol sur l'air dense. Mais du fait des pressions gigantesques, les mouvements de l'air se comportent plutôt comme ceux de l'eau liquide à la surface de la Terre : l'érosion du sol est donc intense même avec des vents de quelques kilomètres par heure seulement.

En plus de la rotation rapide de la haute atmosphère, s'ajoutent de vastes cellules de convection similaires à celles sur Terre : celles-ci se chargent de

redistribuer l'énergie entre l'équateur et les pôles, en parallèle de la redistribution entre le jour et la nuit.



Sur une planète présentant toujours la même face à son étoile, la notion de pôle nord et de pôle sud semble disparaître au profit d'un « pôle jour » et d'un « pôle nuit » séparés par un anneau crépusculaire. Mais l'apparition d'une superrotation de l'atmosphère similaire à celle de Vénus simulerait une planète en rotation, et redonnerait de l'importance aux pôles nord et sud : cela entraînerait une circulation tout aussi complexe que celle de Vénus.

Un monde totalement... excentrique !

Définition **Excentricité** : Elle caractérise la variation de distance à l'étoile au cours d'une année, à cause de l'ellipticité de l'orbite. Elle est comprise entre 0 et 1. À titre d'exemple, une excentricité égale à 0,5 signifie que la distance de la planète à l'étoile varie d'un facteur 3 en six mois. Dans le cas de la Terre, l'excentricité est quasi-nulle.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que la planète possédait une orbite circulaire autour de l'étoile. Or les planètes c et d voisines ont au contraire des orbites elliptiques et très excentriques : il pourrait donc en être de même de la planète

g. Cela signifierait que la planète se rapproche et s'éloigne périodiquement de l'étoile : dans ce cas, elle ne tournerait pas toujours la même face vers la naine rouge, et connaîtrait comme la Terre une succession de jours et de nuits.

Cependant, l'excentricité de l'orbite créerait des journées pour le moins étranges. En effet, une année durerait seulement 36 jours terrestres, et serait plus courte qu'une seule journée ! Le « soleil » ferait des mouvements bizarres dans le ciel au cours de la journée, revenant parfois sur ses pas : il pourrait même parfois se recoucher juste après s'être levé, avant de remonter pour de bon dans le ciel...

Il n'est pas nécessaire d'aller sur un système planétaire lointain pour rencontrer de telles bizarreries : dans notre propre Système Solaire, Mercure connaît précisément ce type de conditions. Sa proximité au Soleil et sa grande excentricité lui font en effet subir des forces de marée qui tendent à « pseudo-synchroniser » sa rotation sur elle-même et sa révolution autour du Soleil : une journée mercurienne dure exactement deux années mercuriennes !

Quelles seraient les conséquences sur le climat de notre étrange planète ? En fait, deux contributions l'influenceraient :

- La variation de l'éloignement de la planète à l'étoile créerait un cycle des saisons : hiver quand la planète est au plus loin, été quand elle est au plus près. Par ailleurs, l'hiver durerait beaucoup plus longtemps que l'été, car une planète va moins vite quand elle est loin de l'étoile.

Notons que les saisons sur Terre ont une cause bien différente : elles sont dues à l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport au plan de l'orbite. Dans le cas de notre naine rouge, l'inclinaison doit rester probablement assez faible à cause des forces de marée.

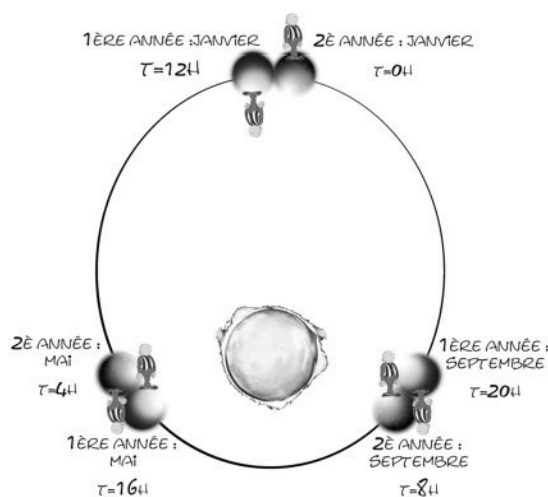
- D'autre part, le cycle jour-nuit jouerait un rôle climatique à

part entière. Imaginons un cas similaire à Mercure : la journée durerait alors deux fois plus longtemps que l'année, c'est-à-dire environ 73 jours terrestres. Cela voudrait dire que c'est « l'été » le matin, « l'hiver » à midi, et à nouveau « l'été » le soir !

Révolution et rotation de Mercure

Le schéma ci-dessous permet de comprendre ce qui se passe sur une planète excentrique subissant des forces de marée comme Mercure. La personne représentée se trouve à un endroit fixe de la surface.

Comme Mercure tourne sur elle-même en même temps qu'elle tourne autour du Soleil, le jour semble s'écouler très lentement à la surface du corps. Ainsi, il est midi en « janvier » de la première année (l'homme est au soleil), et seulement 16 heures en « mai ». Ce n'est qu'au cours de « l'été » que la nuit tombe : il est 20 heures en septembre (l'homme passe à l'ombre). À la fin de l'année, il est minuit : il faudra une année supplémentaire pour qu'il soit à nouveau midi. Une journée dure bien deux années sur cette planète...



Ces notions d'été et d'hiver n'auraient toutefois plus le même sens que sur Terre : en pratique, la température serait plus élevée le jour que la nuit, que ce soit « l'hiver » (midi) ou « l'été » (fin de journée). Par ailleurs, la nuit connaîtrait sans doute une diminution progressive des températures, depuis des soirées

torrides jusqu'à des matins glaciaux... Finalement, on voit que ce cycle jour-nuit piloterait bien plus le climat que le cycle des « saisons », du fait même qu'il s'agit d'un cycle à plus longue période.

Ce type de « Terre », excentrique dans tous les sens du terme, serait à n'en pas douter une fameuse attraction touristique... mais il faudrait être prêt à supporter des conditions climatiques plutôt rudes !

Trop d'eau tue la vie !

Restons dans le système planétaire de Gliese 581, à proximité de la « planète g ». Il nous reste à étudier le deuxième grand scénario envisageable : une migration intense des planètes par le passé.

Cela signifie que ces planètes se sont formées loin de l'étoile, dans une région riche en glace d'eau. De plus, elles devaient être nettement plus volumineuses à l'époque, avec une proportion non négligeable en hélium et en dihydrogène. Bien que « géantes gazeuses », elles étaient sans doute beaucoup plus petites que Jupiter, étant donné la faible masse de leur noyau rocheux : elles devaient ressembler davantage à Uranus ou Neptune.

En se rapprochant de l'étoile, ces planètes ont dû perdre une partie de leur atmosphère d'hélium et de dihydrogène, en raison des rayonnements plus agressifs. Les planètes d et f, les plus externes, pèsent toutes les deux plus de sept fois la Terre : elles ont sans doute conservé une part importante de leurs gaz, et appartiennent donc peut-être à la classe des géantes gazeuses encore aujourd'hui. En revanche, les planètes c et g, plus proches de l'étoile, sont aussi les moins massives (5,4 et 3,2 fois la Terre respectivement) : il est donc possible qu'elles aient été entièrement débarrassées de leurs gaz légers, à savoir l'hélium et le dihydrogène.

À quoi peuvent-elles ressembler aujourd'hui ? Elles sont sans doute toujours enveloppées d'une atmosphère épaisse (diazote, notamment). Par ailleurs, elles doivent avoir conservé l'énorme quantité d'eau acquise dans les contrées lointaines. Or ces deux planètes reçoivent aujourd'hui autant de rayonnements que Vénus et la Terre respectivement : cette eau a donc pu passer à l'état liquide.

Sur les satellites glacés du Système Solaire, l'eau constitue une part importante de la masse du corps : il doit donc en être de même sur nos deux planètes migrantes. La profondeur des océans doit donc se compter en milliers de kilomètres : il est tout à fait impossible que des continents « dépassent » de la surface de l'eau ! Ce sont ainsi de bonnes candidates au rang de « planète océan »...

Carte d'identité de la planète Gliese 581 c

Toutes les valeurs sont indiquées par rapport à la Terre. Selon les observations, l'excentricité de l'orbite pourrait être assez élevée.

- Diamètre : $\times 2,5$
- Masse : $\times 5,4$
- Gravité à la surface : $\times 0,6$
- Luminosité diurne au-dessus des nuages : $\times 2,6$
- Durée du jour : $\times 26$
- Durée de l'année : impact mineur (année plus courte que la journée)
- Pression de surface : $\times 70$? (diazote majoritaire ?)
- Température moyenne : $120\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Rappelons qu'à une pression de 70 bars, l'eau est liquide à $120\text{ }^{\circ}\text{C}$: c'est ce qui lui permet de se maintenir sur la planète. Par ailleurs, il est très probable que l'atmosphère soit totalement opaque, à l'instar de celle de Vénus.

La présence d'un océan sur la planète c peut surprendre, dans le sens où elle reçoit la même quantité de rayonnements que

Vénus ; or Vénus a vu s'évaporer toute son eau à cause des radiations du Soleil... En fait, il existe une différence majeure entre les deux : sur Vénus, il y avait peu d'eau à la surface lors de sa formation, et le dioxyde de carbone dégazé s'est ainsi accumulé dans l'atmosphère. La température a augmenté du fait de l'effet de serre, empêchant l'eau dégazée de rester à l'état liquide.

Mais sur notre « planète c », l'eau préexistait dès le début à la surface du corps, et recouvrait toute la planète : à partir du moment où elle est passée à l'état liquide au cours de la migration, elle a commencé à dissoudre massivement le dioxyde de carbone, l'empêchant de s'accumuler dans l'atmosphère. Cela a limité l'effet de serre, permettant à l'eau de rester liquide.

Il n'est donc pas impossible que de l'eau liquide existe même à proximité d'une étoile, grâce au phénomène de migration. Notre planète c doit ainsi connaître un climat chaud et humide, sous une « chape » atmosphérique probablement opaque.

Or sur Terre, la vie est tout particulièrement exubérante dans les régions chaudes et humides situées près de l'équateur : cela signifie-t-il que la planète c constitue un environnement encore plus favorable que la Terre pour le développement de la vie ?

Hélas non ! Si l'omniprésence de l'eau liquide sur cette « planète bleue » peut sembler plutôt favorable à la vie, elle constitue en fait un handicap majeur. En effet, l'eau est indispensable car elle favorise les réactions chimiques, mais encore faut-il qu'il y ait de la matière qui puisse réagir dans l'eau !

Ainsi sur Terre, la vie s'est sans doute développée sur les plateaux continentaux, là où la couche d'eau était très peu profonde : ainsi, elle a pu bénéficier à la fois de la matière présente dans l'écorce terrestre, de l'énergie du Soleil, et de l'eau liquide pour faciliter les réactions. Tandis que sur une planète océan, les espèces capables de réagir résident à des centaines ou des milliers de kilomètres de profondeur, au niveau des fonds marins : le rayonnement solaire

ne peut guère y parvenir, et ne peut donc pas fournir l'énergie nécessaire pour amorcer les réactions.

Finalement, le processus de migration des planètes est sans doute très efficace pour apporter une grande quantité d'eau liquide dans une région baignant sous un rayonnement stellaire intense ; mais il s'agit en fait d'un processus TROP efficace ! Une trop grande quantité d'eau anéantit ses bienfaits, car l'eau ne suffit pas : il faut certes un « accélérateur » de réactions (l'eau liquide), un « amorceur » de réactions (l'énergie stellaire), mais aussi des espèces participant aux réactions (présentes à la surface du corps solide). Ces trois conditions ne sont pas vérifiées simultanément sur une planète océan, alors qu'elles le sont sur Terre.

Un mécanisme régulant la quantité d'eau ?

Le développement d'une vie intelligente est-il donc impossible dans un système planétaire qui a subi des migrations de planètes ? Le problème est qu'il y a ou bien trop d'eau (sur les gros corps), ou bien pas du tout (sur les plus petits)... Cependant, il existe peut-être un mécanisme qui pourrait réguler la quantité d'eau liquide dans des conditions bien particulières.

Pour le présenter, nous allons devoir nous déplacer dans un système un peu plus propice que Gliese 581 : reprenons place dans notre vaisseau spatial et éloignons-nous fortement de la Terre, à 323 années-lumière de distance. Nous y rencontrons une étoile d'apparence anodine, presque identique au Soleil : il s'agit de la poétique HD73526...

Autour de cette étoile, deux planètes géantes ont été détectées, situées dans la zone tellurique. L'une est trois fois plus massive que Jupiter et reçoit les mêmes rayonnements que Vénus. L'autre

est deux fois et demie plus massive que Jupiter et reçoit les mêmes rayonnements que la Terre. Cette dernière est tout particulièrement intéressante, car elle se trouve dans une région a priori favorable à la vie.

La position de ces planètes pourrait résulter d'une migration dans le passé. Or nous venons de voir que ce phénomène était plutôt défavorable à la vie... Approchons-nous néanmoins de cette très grosse géante, et imaginons son environnement.

De nombreux satellites tournent autour, formant un mini-système planétaire à eux seuls. Focalisons-nous sur le plus gros d'entre eux : quelle surprise nous attend ! Car au lieu du corps desséché ou du « satellite océan » attendu, nous faisons face à un monde d'océans et de continents capables d'abriter la vie !

Pour comprendre une telle situation, sautons dans le passé, lors de la formation du système planétaire. La planète était située loin de l'étoile. Parmi ses satellites, nous allons imaginer que l'un d'eux mesurait 10 000 km de diamètre : presque deux fois plus que le plus gros satellite du Système Solaire... Mais n'oublions pas que la planète est elle-même 2,5 fois plus massive que Jupiter : il n'est donc pas exclu que ses satellites soient particulièrement volumineux.

Nous allons de plus supposer que ce gros satellite était situé tout près de la planète : perturbé par un autre satellite plus petit, il connaissait un phénomène de malaxage assez intense, un peu à l'instar d'Europe (satellite de Jupiter). Sans doute possédait-il alors une lourde atmosphère de diazote comme Titan (satellite de Saturne).

Puis la planète a rapidement migré vers l'intérieur du système planétaire : ce faisant, le diazote a été éjecté dans l'espace par les rayonnements devenus plus intenses, détruisant son atmosphère. La glace d'eau a elle-même commencé à s'évaporer et à s'échapper de l'attraction du corps. Le processus s'est poursuivi jusqu'à ce

que l'océan d'eau liquide situé sous la surface glacée se réduise fortement. Le dioxyde de carbone craché par le volcanisme, jusqu'alors dissous au fur et à mesure dans les océans, a donc commencé à s'accumuler. Comme il s'agit d'un gaz lourd qui ne s'enfuit pas facilement, il s'est maintenu dans l'atmosphère.

Finalement, un équilibre naturel s'est mis en place : le dioxyde de carbone dégagé a permis de créer une pression suffisante pour que l'eau résiduelle reste liquide en surface. Le satellite a ainsi gardé une petite quantité d'eau, infime par rapport à celle initiale : des continents jadis noyés sous l'océan sous-glaciaire ont émergé, notamment les massifs volcaniques liés aux forces de marée. Toutes les conditions favorables à la vie étaient alors en place.

De plus, le satellite a bénéficié de deux avantages qui ont manqué à Mars : d'une part son atmosphère était protégée d'une partie des radiations par le champ magnétique de la géante gazeuse. D'autre part le satellite continuait à éjecter régulièrement du dioxyde de carbone grâce au malaxage interne. Finalement, l'eau liquide et la vie ont pu se maintenir sur le long terme.

Notons qu'en perdant son eau, le satellite a dû perdre une partie de sa masse ; mais en supposant que son diamètre est réduit à 6 500 kilomètres, cela reste suffisant pour maintenir l'atmosphère de dioxyde de carbone en place. C'est d'ailleurs le cas sur Mars, qui possède précisément cette taille.

Pour peu que le volcanisme n'ait pas été trop intense, le dioxygène créé par la vie a alors pu s'accumuler dans l'atmosphère, après avoir oxydé les roches. Finalement, l'atmosphère s'est stabilisée avec un mélange de dioxyde de carbone et de dioxygène. La surface quant à elle est devenue un mélange de glace, d'eau liquide, et de continents. On peut alors se plaire à imaginer une civilisation extraterrestre sur ces continents, développée grâce à l'énergie du dioxygène de l'air et à celle du rayonnement solaire : il s'agirait d'un véritable équivalent de la

Le scénario idéal

Récapitulons les caractéristiques d'un hypothétique satellite au cours des différentes étapes du scénario que nous avons mis en avant :

1 – Satellite en cours de formation, à une grande distance de l'étoile

- Diamètre = 10 000 km ; Densité = 2,1 ; Gravité à la surface = $2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Atmosphère = quelques bars de diazote
- Exemple type dans le Système Solaire, en plus petit : Titan

2 – Rapprochement de l'étoile

- Perte de l'atmosphère à cause des rayonnements, la surface glacée est mise à nu
- Exemple type dans le Système Solaire, en plus petit : Ganymède

3 – Sublimation de la glace d'eau (transformation en vapeur), l'eau s'échappe définitivement

- Diamètre = 6 500 km ; Densité = 3,8 ; Gravité à la surface = $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Exemple type dans le Système Solaire : Mars

4 – Accumulation du dioxyde de carbone dès que la quantité d'eau devient faible

- Formation d'une atmosphère de CO_2 , qui maintient l'eau restante sous forme liquide à la surface
- Exemple type dans le Système Solaire : la Terre primitive (?)

5 – Développement de la vie, accumulation de dioxygène grâce la photosynthèse

- L'atmosphère dense devient un mélange de dioxyde de carbone et de dioxygène.
- Exemple type dans le Système Solaire : Aucun, sur Terre le diazote remplace le dioxyde de carbone comme espèce principale dans l'atmosphère

Notons qu'au cours de cette évolution, la gravité à la surface a augmenté alors que le satellite a perdu de la masse, ce qui paraît contradictoire. Cela est dû au fait que l'eau perdue est très légère : le satellite est donc devenu

de plus en plus dense au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau. C'est ce qui explique que le diazote se soit échappé dès le début, alors que le dioxyde de carbone et le dioxygène ont pu se maintenir, une fois le satellite « dégraissé »...

Dans le scénario proposé, nous avons fait intervenir un gros satellite orbitant autour d'une géante gazeuse migrante. Il pourrait aussi s'appliquer directement à une planète, à condition qu'elle soit suffisamment petite pour perdre son atmosphère au cours de la migration. L'essentiel est de posséder cette « taille intermédiaire » permettant au diazote de s'échapper, mais autorisant le dioxyde de carbone à rester une fois la majeure partie de l'eau enfuie.

Toutefois, au vu des connaissances actuelles, un tel scénario reste tout à fait hypothétique. Par ailleurs, les critères sur la taille du corps et l'ampleur de la migration pourraient en faire une situation assez rare dans la galaxie.

La proportion de systèmes planétaires possédant des « planètes océans » est assurément beaucoup plus grande : s'ils sont sans doute peu favorables à l'émergence d'une vie intelligente, ils constituent en revanche des oasis accueillantes pour le voyageur interstellaire assoiffé...

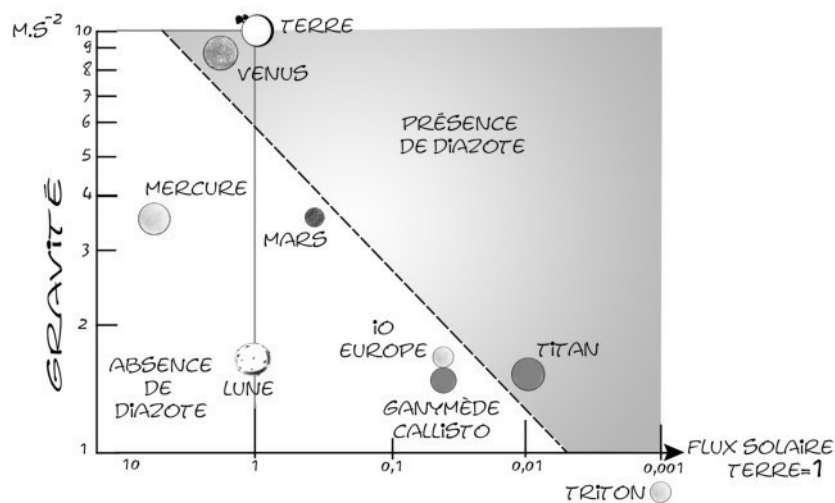
Les conditions de présence d'une atmosphère

Le graphique ci-dessous représente la gravité à la surface des principaux corps solides du Système Solaire, en fonction du flux solaire reçu. Celui-ci décroît comme le carré de la distance au Soleil. Les échelles sont logarithmiques.

Plus un corps est dense et massif, plus il est haut dans le graphique : c'est le cas notamment de Vénus et de la Terre, tandis que Triton, très petit et très peu dense, est bon dernier. L'éloignement du Soleil augmente de gauche à droite.

La limite d'existence du diazote dans l'atmosphère a été représentée schématiquement par la droite en diagonale : un gaz se maintient plus

facilement sur un corps dense et massif subissant peu de radiations solaires, c'est-à-dire en haut à droite du graphique.



On retrouve les trois planètes possédant du diazote : Titan, la Terre et Vénus. Sur cette dernière, le diazote ne forme que 3,5 % de l'atmosphère, mais ce constat est trompeur car la pression y est considérable : en quantité, il y a bel et bien autant de diazote sur Vénus que sur Terre. Par ailleurs, on voit que Titan compense sa faible masse par un grand éloignement au Soleil, permettant au diazote de s'y maintenir.

Tous les autres corps solides sont dénués de diazote, donc en pratique presque dénués d'atmosphère : Mercure et la Lune sont particulièrement hors concours... Le cas de Mars est intéressant car elle n'est pas loin de la limite d'existence du diazote : si cette planète avait été un tout petit peu plus massive, le diazote serait resté, maintenant la pression au-dessus des 6 mbar fatidiques. L'eau serait restée à l'état liquide, et elle se serait maintenue sur la planète jusqu'à aujourd'hui... Cette planète n'a décidément pas eu de chance !

Il reste à dire un mot sur Triton, principal satellite de Neptune : grâce à son éloignement du Soleil, il devrait posséder une atmosphère non négligeable de diazote (il suffit de prolonger la ligne en pointillés pour s'en apercevoir). Or il ne possède qu'une atmosphère très ténue...

En fait, les températures y deviennent si faibles que le diazote y est à l'état solide : il est resté à la surface jusqu'à aujourd'hui ! Il suffirait d'ailleurs d'augmenter légèrement le chauffage pour le faire passer dans l'atmosphère : de fait, il semble que la quantité de diazote dans l'atmosphère de Triton ait augmenté sensiblement depuis le passage de la sonde Voyager 2 en 1989, en raison d'un réchauffement depuis cette date.

Un couple pour la vie ?

Pour terminer ce petit tour d'horizon des environnements planétaires présents dans notre coin de galaxie, nous allons nous intéresser à présent aux étoiles qui vivent en couple. Notre Soleil solitaire ne nous a pas habitués à une telle situation ; pourtant elles sont nombreuses autour de nous, ces « étoiles binaires » ! Afin de comprendre l'aspect actuel de ces étoiles et de leurs planètes, précisons préalablement les conditions de leur formation.

Les étoiles naissent de la contraction d'immenses nuages de gaz et de poussières présents un peu partout au sein de la galaxie : la « mise en route » d'un tel effondrement peut être due au choc engendré par l'explosion d'une supernova voisine.

En déstabilisant l'ensemble du nuage, ce choc peut entraîner l'existence de plusieurs « noyaux d'effondrement », conduisant à la naissance de plusieurs étoiles : en pratique, les étoiles naissent donc souvent en groupe, plutôt que de façon isolée. Une fois formées, la plupart suivent ensuite leur propre chemin en s'éloignant peu à peu les unes des autres. Mais si deux étoiles sont suffisamment massives et suffisamment proches l'une de l'autre, alors elles peuvent rester liées gravitationnellement, et former un couple éternel...

C'est la raison pour laquelle il existe de nombreux systèmes de deux, voire trois étoiles, orbitant les unes autour des autres dans la galaxie. Le voisinage du Soleil en est une illustration éloquente : sur les sept étoiles situées à moins de 12 années-lumière de distance et qui ne sont pas des naines rouges, cinq sont en réalité des étoiles doubles ou triples. Ainsi, le « célibat » du Soleil apparaît davantage comme l'exception que la norme...

Définition

Étoile binaire : Système de deux étoiles en orbite l'une autour de l'autre. Cette situation est courante dans la

galaxie car les étoiles naissent souvent en groupe lors de l'effondrement de la nébuleuse primordiale.

Au vu de la grande quantité de « systèmes stellaires », il paraît crucial de savoir à quoi pourraient ressembler des systèmes planétaires orbitant autour : notamment, la vie a-t-elle autant de chances d'y apparaître qu'autour d'une étoile simple comme le Soleil ?

L'existence d'un système de deux étoiles entraîne une première conséquence forte : une planète tournant autour de l'une des deux étoiles serait fortement perturbée par la présence gravitationnelle de la seconde, ce qui déstabiliserait son orbite et la précipiterait dans la fournaise de l'un des deux astres.

Pour que ce scénario catastrophe ne se produise pas, il faudrait que la planète soit vraiment beaucoup plus proche de l'une des étoiles que de l'autre, ce qui peut facilement être le cas pour deux étoiles très éloignées. En revanche, si les étoiles forment un « couple serré », l'existence d'une planète à proximité devient peu probable.

Nous pouvons aussi imaginer une planète qui orbiterait autour des deux étoiles à la fois : il paraît clair que les deux étoiles doivent alors paraître presque confondues du point de vue de la planète, pour qu'elles se comportent comme s'il s'agissait d'un seul astre. Dans le cas contraire, l'orbite deviendrait très chaotique et la planète finirait par être expulsée du système. En pratique, cette situation ne peut se produire que si ces deux étoiles forment un « couple très serré ».

Résumons :

- Si les étoiles sont très proches l'une de l'autre, alors la présence de planètes orbitant très loin du couple est envisageable. Étant donné l'éloignement, il ne peut s'agir que de géantes gazeuses ou de corps glacés, ce qui semble plutôt

hostile à la vie.

- Si les étoiles sont très loin l'une de l'autre, alors la présence de planètes orbitant très près de l'une des deux étoiles est envisageable. Il s'agirait de planètes telluriques, étant donné la proximité de l'étoile. Pourraient-elles abriter de l'eau liquide ? Nous avons vu qu'une partie de l'eau sur Terre venait sans doute des régions externes du Système Solaire. Or ici la présence de la deuxième étoile pourrait gêner cet apport d'eau issue de la périphérie. Dans l'état actuel des connaissances, il est toutefois difficile de conclure sur les possibilités d'existence de l'eau liquide dans les systèmes d'étoiles doubles.
- Enfin, si les étoiles sont « modérément » proches l'une de l'autre, nous aurions d'une part des planètes très chaudes situées très près de chaque étoile, et d'autre part des planètes très froides orbitant très loin du système stellaire. Certes, la variété serait au rendez-vous, mais la perspective d'y trouver un climat « tempéré » favorisant la vie paraît nettement plus réduite...

Les disques protoplanétaires à la rescousse

Au début de l'Histoire du Système Solaire, alors que les planètes n'étaient pas encore complètement formées, de très nombreux petits corps orbitaient de façon chaotique et s'entrechoquaient régulièrement, formant comme une immense ceinture d'astéroïdes. Les poussières et le gaz du nuage originel n'avaient pas encore été complètement happés par le Soleil ou les planètes. On dit que le Système Solaire était au stade de « disque protoplanétaire », riche en corps de toutes tailles.

L'intérêt d'un disque protoplanétaire est qu'il est beaucoup plus facile à observer que des planètes, de par ses dimensions : l'observation de tels disques autour d'étoiles jeunes permet donc de se faire une idée de la quantité de matière présente. Plus le disque apparaît dense, plus il est susceptible de former des planètes massives à l'avenir.

L'observation de ces disques autour des jeunes étoiles doubles est particulièrement instructive. On a constaté qu'ils étaient fréquents dans

deux cas bien distincts :

- Lorsque les deux étoiles sont à moins de 3 UA (unités astronomiques) l'une de l'autre, elles possèdent souvent un disque qui englobe les deux astres à grande distance. Les planètes susceptibles de s'y former sont des géantes gazeuses.
- Lorsque les deux étoiles sont à plus de 50 UA l'une de l'autre, alors un disque se trouve souvent à proximité de chacune d'entre elles. Les planètes susceptibles de s'y former sont telluriques.
- Pour des distances intermédiaires entre les deux étoiles (de 3 UA à 50 UA), peu de disques ont été détectés.

Les observations des disques protoplanétaires confirment donc les zones potentielles de formation de planètes suggérées par les modèles. Notons toutefois que des disques pourraient aussi exister autour des étoiles de distance « intermédiaire » : en effet, de tels disques ne peuvent que s'étendre sur de faibles distances à proximité de chacune des deux étoiles, ce qui explique qu'ils soient plus difficiles à détecter. L'existence de planètes dans ce type de systèmes stellaires n'est donc pas à exclure.

Le Système d'Alpha du Centaure

Nous allons terminer notre périple spatial par l'étoile qui a sans doute le plus d'intérêt vis-à-vis du Terrien, du fait de sa proximité : il s'agit d'Alpha du Centaure, bien visible depuis l'hémisphère sud. Ce qui apparaît comme une simple étoile depuis la Terre est en réalité un système de trois étoiles en orbite les unes autour des autres.

Les deux étoiles principales sont très similaires au Soleil : l'une légèrement plus blanche et lumineuse, l'autre légèrement plus orangée et moins intense. Elles décrivent une orbite elliptique l'une autour de l'autre, qui conduit à modifier sans cesse la distance entre les deux astres : celle-ci oscille entre 11,2 UA (unités astronomiques) et 35,6 UA (soit plus du triple !). C'est comme si, dans le Système Solaire, une deuxième étoile orbitait dans la zone des géantes gazeuses, oscillant entre l'orbite de Saturne et l'orbite de Neptune...

La troisième étoile du système d'Alpha du Centaure est incomparablement plus loin des deux autres, et « ne joue pas dans la même cour »... Il s'agit d'une minuscule naine rouge située à 13 000 UA des deux autres étoiles ! Cela signifie que le temps qu'il lui faut pour réaliser une orbite est de l'ordre du million d'années ! Depuis le couple stellaire principal, cette naine rouge serait tout simplement invisible à l'œil nu...

Cette distance est tellement grande que l'utilisation de « l'unité astronomique » n'est plus très pertinente : il vaut mieux utiliser l'année-lumière. La distance du système d'Alpha du Centaure à la Terre dépend alors de l'étoile considérée : si les deux étoiles principales sont situées à 4,36 années-lumière de distance, la naine rouge n'est « qu'à » 4,22 années-lumière. La différence n'est pas négligeable !

Cette fameuse naine rouge s'appelle « Proxima du Centaure » : il s'agit ni plus ni moins de l'étoile la plus proche du Soleil. Elle est tellement loin du couple d'Alpha du Centaure qu'il n'est pas même certain qu'elle soit bel et bien en orbite autour... Ce qui est sûr en revanche, c'est que les trois étoiles sont nées en même temps dans la même nébuleuse, et sont toujours restées voisines depuis ce jour.

Finalement, Proxima du Centaure se comporte comme une étoile solitaire, étant donné l'éloignement des deux autres. Il s'agit d'une banale naine rouge très peu lumineuse, sujette à de fréquentes « sautes d'humeur » qui font varier fortement sa luminosité ; c'est d'ailleurs le lot de beaucoup de naines rouges très peu massives. Cette étoile ne nous intéressera donc pas dans la suite. Nous nous focaliserons plutôt sur les deux autres étoiles du système d'Alpha du Centaure.

De la vie sur Alpha du Centaure ?

Nous avons vu que la distance entre les deux étoiles variait considérablement, comme si une deuxième étoile oscillait dans le Système Solaire entre les orbites de Saturne et de Neptune. Aucune planète ne peut donc subsister dans toute cette zone, car elle serait aussitôt happée par l'étoile. Pour qu'une géante gazeuse existe, il faudrait qu'elle se trouve beaucoup plus loin, largement au-delà de l'orbite de Neptune. Le risque est que la matière du nuage originel fasse défaut dans des régions aussi lointaines : dans le Système Solaire, il y a eu trop peu de matière pour former une planète au-delà de Neptune.

Finalement, la formation de géantes gazeuses dans le système d'Alpha du Centaure paraît plutôt délicate. De fait, aucune planète n'a encore été détectée, ce qui montre qu'aucune grosse planète n'orbite à proximité.

Pour trouver des planètes, il est donc préférable de se rapprocher fortement de l'une des deux étoiles principales. Les calculs tendent à indiquer qu'une planète située à plus de 2 UA d'une étoile ne pourrait pas subsister longtemps, du fait des perturbations dues à la deuxième étoile. Il faut donc se rapprocher davantage, dans la région des planètes telluriques.

Pour qu'une planète reçoive le même rayonnement que sur Terre, il faudrait qu'elle soit à 1,25 UA de l'étoile blanche, ou à 0,7 UA de l'étoile orangée. Ces valeurs restent bien en dessous des 2 UA critiques, et des planètes pourraient donc bel et bien exister à ces endroits. Le fait qu'on n'ait encore rien détecté s'explique simplement : les planètes de masse terrestre restent encore en dehors des capacités actuelles de détection.

La présence d'eau sur de telles planètes n'est hélas pas assurée : comme nous l'avons vu, les deux étoiles ont « fait le ménage » dès les origines en éliminant toutes les géantes gazeuses et les corps glacés associés. Cela signifie que l'eau n'a peut-être pas pu être apportée des régions externes. Il reste à espérer que de l'eau

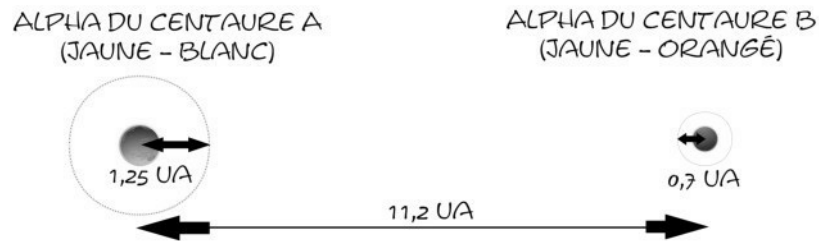
ait pu se former sur place, au sein même de la zone tellurique... Mais pour pouvoir répondre à cette question, il faudrait déjà savoir d'où vient l'eau de la Terre, ce que nous ignorons encore aujourd'hui !

Dans la suite nous allons supposer que ces planètes contiennent de l'eau, bien qu'en quantité plus réduite que sur Terre. À supposer qu'elles soient assez massives, elles pourraient alors présenter de vastes continents associés à quelques mers fermées.

Focalisons-nous sur une hypothétique planète orbitant à 0,7 UA de l'étoile orangée : quel serait le quotidien sur un tel corps ? Une année ne durerait que 224 jours, mais la principale originalité serait ailleurs : en effet, pendant toute une saison, le jour serait permanent... en raison de la présence de la deuxième étoile : l'étoile blanche se lèverait au moment où l'étoile orangée se coucherait... Certes, l'étoile blanche apparaîtrait faible et lointaine, mais cela serait suffisant pour que les nuits y ressemblent davantage à des jours... Après cette saison lumineuse, s'ensuivrait une saison durant laquelle l'étoile blanche se coucherait en milieu de nuit, ne laissant que quelques courts moments d'obscurité. Puis arriverait la « saison normale » avec des nuits presque complètes. Enfin, le cycle s'achèverait avec une étoile blanche se levant en milieu de nuit.

Les deux civilisations d'Alpha du Centaure...

Sur le schéma ci-dessous, les orbites d'hypothétiques planètes recevant le même rayonnement que la Terre ont été représentées, autour de chacune des deux étoiles. La distance entre les deux étoiles est à l'échelle : l'influence gravitationnelle de la deuxième étoile reste minime. De plus, c'est la distance minimale entre les deux étoiles qui a été représentée : au bout de 40 ans (c'est-à-dire une demi-révolution), elles se retrouvent trois fois plus éloignées l'une de l'autre...



Malgré cela, la luminosité de la deuxième étoile reste suffisante pour éclairer les nuits de la planète : lorsque la distance est minimale, elle est équivalente à la lumière du Soleil vue depuis Saturne. Ainsi, une nuit sur l'une des deux planètes serait bien plus lumineuse qu'un jour sur Titan, où l'atmosphère voile la lumière solaire...

Quant à Proxima du Centaure, il faudrait la placer à 130 mètres de distance pour respecter l'échelle ! Cette minuscule naine rouge est tout simplement invisible depuis les deux étoiles principales.

Ces nuits particulièrement lumineuses seraient plutôt bénéfiques pour la vie, par le biais de la photosynthèse. Par ailleurs, les étoiles doubles donnent deux fois plus de chance à la vie d'émerger : une planète de type terrestre peut en effet exister autour de chaque étoile, conduisant à deux civilisations extraterrestres distinctes vivant en bon voisinage...

Finalement, il demeure deux questions majeures avant d'envisager ce type de situation : les perturbations dues aux deux étoiles laisseraient-elles suffisamment de matière pour former des planètes telluriques volumineuses semblables à la Terre ? Et l'eau pourrait-elle se former dans de telles régions ? Ces deux questions sont le préalable à l'existence d'eau liquide, donc à l'existence de la vie... Indéniablement, le système d'Alpha du Centaure restera l'objet de toutes les attentions dans les prochaines décennies.

Notes

[\[1\]](#) Quelques planètes avaient déjà été détectées auparavant, mais elles orbitaient autour de pulsars et non d'étoiles « vivantes » comme le Soleil. Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide qui forme le vestige d'une étoile massive ayant explosé en supernova. La vie extraterrestre est probablement impossible dans un tel environnement.

[\[2\]](#) Fin 2010, cette information restait à confirmer par des analyses supplémentaires.

Où se cachent-ils ?

« Deux possibilités existent : soit nous sommes seuls dans l'Univers, soit nous ne le sommes pas. Les deux hypothèses sont tout aussi effrayantes. »

Arthur C. Clarke

Une profusion de « Terre » dans la galaxie

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes amusés à imaginer différents environnements extraterrestres susceptibles d'abriter la vie. Le moment est venu d'évaluer les chances que « les extraterrestres soient effectivement parmi nous » au sein de la Galaxie et de l'Univers.

Le premier critère est l'abondance des systèmes planétaires dans l'Univers : en effet, nous avons vu que la vie avait bien plus de chances d'émerger sur une planète orbitant autour d'une étoile. Comme nous avons pu le constater dans le chapitre précédent, les découvertes des dernières années sont très encourageantes à ce niveau.

À ce sujet, il faut bien avoir à l'esprit deux faits majeurs : d'abord, la plupart des planètes découvertes ne sont qu'à quelques dizaines ou centaines d'années-lumière de la Terre, car ce sont les plus faciles à détecter. Or la taille de la Galaxie est de l'ordre de la centaine de milliers d'années-lumière ! C'est comme si nous étions en train de nous focaliser sur les brins d'herbe d'un terrain de foot

situés à moins de 10 cm de nous...

Le deuxième point fort, c'est que nous ne voyons pour l'instant que les plus grands brins d'herbe, ceux qui dépassent parmi tous les autres... Nous serions encore incapables de détecter l'équivalent de la Terre dans un autre système planétaire. Ainsi, même dans notre petit carré d'herbe de 10 cm, nous n'avons pour l'instant qu'un premier aperçu extrêmement superficiel, pas du tout représentatif de la densité réelle de brins d'herbe...

Les découvertes d'exoplanètes des quinze dernières années, qui augmentent exponentiellement, tendent donc à indiquer que le nombre de planètes dans notre galaxie pourrait être considérable, peut-être équivalent au nombre d'étoiles lui-même : beaucoup d'étoiles ne possèdent certes pas de système planétaire, mais la plupart des systèmes comptent plusieurs planètes, à l'instar du nôtre. Des systèmes à sept planètes au moins ont déjà été découverts, et ce n'est bien sûr qu'un chiffre très provisoire : il paraît clair que les systèmes au moins aussi riches que le nôtre constituent des cas très courants partout dans la Galaxie.

Or notre Galaxie contient quelques centaines de milliards d'étoiles... et n'est elle-même qu'une infime poussière dans l'Univers ! Ainsi, parmi cette myriade de planètes qui virevoltent autour de nous, une multitude existe dont la masse et la distance à l'étoile correspondent exactement à celle de la Terre. Bien sûr, comme nous l'avons vu, de parfaits équivalents de la Terre ne semblent pas indispensables pour envisager l'émergence de la vie ; mais même si nous restreignons les recherches aux jumelles de la Terre, il semble que nous ayons déjà largement de quoi faire !

Une estimation pessimiste serait qu'une étoile sur dix seulement possède un système planétaire. Elle tiendrait compte de la difficulté à former des planètes autour de certaines étoiles doubles, ou encore de la faible masse disponible pour former des

gros corps autour de certaines naines rouges. Parmi ces systèmes, supposons que seuls quelques pourcents possèdent une planète de masse comparable à la Terre située dans la « zone d'habitabilité » (c'est-à-dire recevant le même rayonnement stellaire que la Terre ou Mars) : il nous en reste tout de même près d'un milliard... De plus, certains de ces systèmes pourraient posséder plusieurs planètes vérifiant ces critères !

La présence d'eau liquide sur de tels corps ne semble pas être un critère fortement éliminatoire : l'eau est très abondante dans l'Univers, et nous avons précisément sélectionné les planètes où cette eau serait liquide, au vu des pressions et des températures de surface. Maintenant, soyons avares et divisons par dix le nombre précédent pour ne garder que des planètes terrestres dotées d'océans et de continents : il reste cent millions de planètes de ce type dans notre Galaxie.

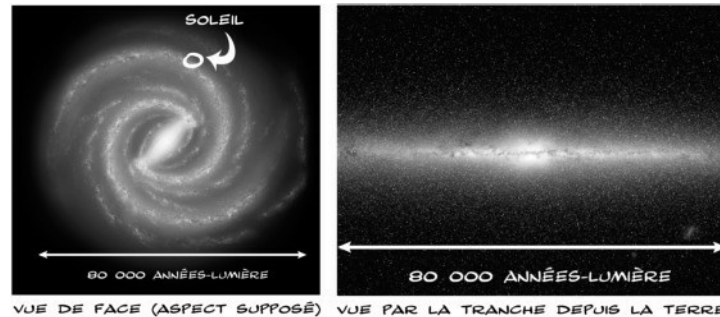
La Voie Lactée

La photo de gauche ci-dessous est celle d'une galaxie vue de face, probablement très semblable à la nôtre. La position estimée du Soleil dans la Voie Lactée a été représentée : situé à environ 28 000 années-lumière du centre, il appartient plutôt à la région périphérique, assez pauvre en étoiles. La totalité des étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel nocturne est située à l'intérieur du cercle blanc. Ce cercle est plus petit que l'épaisseur de la galaxie : c'est la raison pour laquelle les étoiles semblent uniformément réparties autour de nous, et ne semblent pas plus nombreuses dans le plan galactique. La Voie Lactée contient entre 200 et 400 milliards d'étoiles : nous n'en voyons qu'une fraction infime.

Les « bras spiraux », particulièrement riches en étoiles, sont bien visibles, s'enroulant autour du centre galactique. Ce ne sont pas toujours les mêmes étoiles qui constituent ces bras : ainsi le Soleil les traverse régulièrement au cours de sa révolution autour du centre galactique, et se retrouve alors au milieu d'une densité plus grande d'étoiles. Le Système Solaire est sans doute davantage perturbé au cours de ces périodes : plus grand nombre de comètes venues du nuage de Oort, rayons cosmiques plus agressifs...

On notera enfin la présence d'une « barre » près du centre galactique,

particulièrement riche en étoiles.



La photo de droite a été prise depuis la Terre en direction du centre galactique (situé dans la constellation du Sagittaire) : la Voie Lactée apparaît vue par la tranche (il suffit de lever les yeux vers le ciel nocturne pour l'observer...). Le bulbe central, particulièrement lumineux, se détache nettement. Il est partiellement occulté par une traînée sombre, due aux poussières qui se trouvent entre le Soleil et le centre de notre galaxie.

Notons au passage qu'elles n'y sont sans doute pas équitablement réparties : ainsi, elles doivent être plus nombreuses dans les « bras spiraux », ou encore à faible distance du centre galactique, que dans le voisinage du Soleil.

La vie est-elle exigeante ?

Le critère le plus délicat apparaît bien sûr maintenant : la vie émergerait-elle naturellement sur une planète dotée d'océans et de continents, et baignée par la lumière de son étoile ? Le problème crucial est notre incapacité à reproduire expérimentalement le scénario de l'émergence de la vie.

Comme nous l'avons vu, la Nature tend à réaliser toutes les réactions chimiquement possibles, et ne garde naturellement que les structures stables. Ainsi, même si le scénario du développement de la vie paraît impossible à reproduire de par sa complexité, cela ne réduit pas forcément ses chances de se réaliser ailleurs à l'identique. Il ne faut surtout pas s'imaginer la Nature s'évertuant à réaliser spécifiquement les réactions

chimiques menant à la cellule du corps humain : avec un tel raisonnement, on ne peut que conclure que nous sommes seuls dans l'Univers ! En réalité, la Nature essaie toujours toutes les réactions possibles, donc en particulier celles qui mènent à la cellule. La réalisation des réactions complexes du vivant n'est donc pas un « choix » : elles ne sont qu'un infime échantillon de l'ensemble gigantesque de réactions chimiques engagées. Les espèces formées qui demeurent sont celles qui peuvent subsister à long terme, c'est-à-dire celles dont la structure est capable d'être répliquée facilement. En prenant une composition chimique, une température et des rayonnements similaires à ceux de la Terre primitive, il est donc probable que les structures stables produites seront assez proches de celles apparues sur Terre.

Bien sûr, il demeure une inconnue considérable à ce niveau : la température et la composition chimique de la Terre ont énormément varié au cours du temps. On pourrait se dire qu'il s'agit d'un signe de robustesse, et que la vie pourrait se développer de façon similaire même dans des conditions quelque peu différentes. Mais peut-être la vie a-t-elle eu besoin précisément de telles variations de température et de composition pour naître ! L'accumulation du dioxygène dans l'atmosphère, qui a changé complètement sa composition, en est un bel exemple : aucune vie intelligente n'aurait sans doute pu émerger sans ce changement radical.

De même, une planète similaire à la Terre mais dotée d'un environnement un peu plus stable ne pourrait peut-être pas permettre l'essor de la vie : au cours du processus de construction des cellules, peut-être certaines réactions nécessiteraient-elles des températures très chaudes, et d'autres des températures plus fraîches ? Le processus serait alors impossible à reproduire dans un environnement désespérément stable où la température varierait moins que sur Terre.

En résumé, l'immense complexité de la vie n'est pas du tout un critère qui indiquerait qu'elle est non reproductible. En revanche, notre ignorance des mécanismes mis en œuvre doit nous conduire à la plus grande prudence concernant les possibilités d'émergence de la vie sur d'autres planètes. Aujourd'hui, il est impossible de savoir si l'apparition d'une vie intelligente nécessite exactement les mêmes variations de température et de composition que celles que la Terre a connues, ou si au contraire les réactions chimiques en jeu en autorisent d'autres.

Le bac à sable

Imaginons un enfant ayant à disposition un bac à sable, à qui on demanderait de réaliser un château fabuleux, digne d'un conte de fées. L'enfant va se mettre au travail avec engouement, il s'évertuera à réaliser les structures les plus complexes possibles afin d'embellir son château. Mais tôt ou tard viendra un moment où la structure ajoutée, trop peu stable, s'écroulera, et avec elle tout le château. Malgré la motivation et les compétences de l'enfant, le projet était assurément trop ambitieux.

Supposons maintenant qu'on mette toute une plage de sable à disposition d'une armée de robots complètement ineptes, programmés pour édifier des structures de façon parfaitement aléatoire. Les robots construiront des dizaines de milliers de châteaux simultanément qui, conçus de façon complètement chaotique, s'effondreront pour la plupart au premier grain de sable. Mais parmi cette pléiade de châteaux tous différents, s'en trouveront certains qui resteront stables. Finalement, il ne demeurera sur la plage que les châteaux bien conçus, des plus simples aux plus complexes. Et parmi eux, pourvu que la plage soit assez grande et qu'assez de temps ait passé pour permettre de multiples tentatives, se détachera le fabuleux château de la Belle aux Bois Dormants...

De même, c'est précisément parce que la Nature (comprenez les lois de la physique) n'avait aucune intelligence particulière dans sa démarche que l'intelligence a pu naître sur Terre...

À la recherche de conditions plus restrictives

Continuons à adopter un scénario pessimiste : parmi les cent millions de planètes de type terrestre dans notre galaxie, y en a-t-il qui connaissent exactement les mêmes conditions environnementales que la Terre, et subissent les mêmes variations à court terme comme à long terme ?

Il faudrait pour cela que la planète se trouve à la même position que la Terre, autour d'une étoile similaire au Soleil possédant des variations d'activité comparables. Sans être omniprésentes, ces étoiles sont relativement nombreuses, car le Soleil est une étoile « moyenne » relativement standard.

La planète devrait tourner suffisamment vite sur elle-même pour disposer d'un champ magnétique et des variations diurnes similaires. Il faudrait aussi qu'elle ait une orbite à peu près circulaire autour de l'étoile : il s'agit des cas les plus fréquents en pratique.

Nous pourrions aussi invoquer l'existence de la Lune, qui permet de stabiliser l'inclinaison de l'axe terrestre, et empêche ainsi les saisons d'être trop accentuées. Il faut reconnaître que la naissance de la Lune, née d'une collision avec un corps de la taille de Mars aux débuts de l'Histoire du Système Solaire, n'est pas anodine : seule une petite fraction d'exoplanètes telluriques possèdent sans doute un satellite aussi gros pour stabiliser leur axe.

La Lune a-t-elle vraiment joué un rôle primordial pour atténuer la gamme de températures que la Terre a connues dans le passé ? En fait, si les conséquences climatiques au niveau des pôles ont dû être réelles, celles au niveau de l'équateur paraissent bien plus dérisoires : même avec un axe incliné de 90° , l'équateur ne connaît pas d'amplitude annuelle ou diurne plus importante. Ainsi, même sur des planètes ne possédant pas de lune, le développement de la vie à l'équateur doit être peu perturbé par ces changements d'inclinaison.

La Lune, un satellite improbable

Si les satellites planétaires sont nombreux dans le Système Solaire, ils sont tous beaucoup plus petits que la planète autour de laquelle ils tournent : le rapport de taille est largement supérieur à dix en général. Le système Terre-Lune forme une exception absolument unique : la Lune est 1,8 fois plus petite que la Terre, ce qui est un rapport remarquablement faible. Ainsi, le système Terre-Lune forme un véritable « couple » : c'est d'ailleurs le seul cas où le satellite est capable d'agir fortement sur sa planète (la Lune exerce des forces de marée sur la Terre).

Le couple Pluton – Charon constitue un deuxième exemple similaire, mais à beaucoup plus petite échelle : Pluton n'est d'ailleurs plus considérée comme une planète à part entière.

Le caractère exceptionnel de la Lune est confirmé par comparaison avec les planètes telluriques : Mercure et Vénus ne possèdent aucun satellite, tandis que Mars ne possède que deux « cailloux » très mineurs en orbite autour d'elle (taille : 27 km de long, contre 3 500 km de diamètre pour la Lune...). De plus, ce sont des satellites très « provisoires » (l'un d'eux, Phobos, sera détruit par les forces de marée d'ici 11 millions d'années).

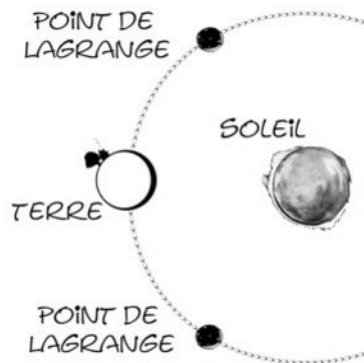
Le scénario généralement retenu pour la naissance de la Lune, si mystérieuse, est le suivant. Le long de l'orbite de chaque planète se trouvent deux endroits de relative stabilité, qui tendent à retenir la matière : il s'agit des « points de Lagrange » (voir le schéma ci-dessous). Des corps tendent donc naturellement à s'y agglomérer : par exemple, encore aujourd'hui, des astéroïdes peuplent les points de Lagrange de Jupiter.

Aux débuts de l'Histoire du Système Solaire, la matière s'est donc agglomérée sur les points de Lagrange de la Terre : sur l'un d'eux, cette agglomération est allée jusqu'à former un corps de la taille de Mars.

Au cours de ses oscillations et des perturbations gravitationnelles, ce corps a fini par quitter son point de Lagrange : déstabilisé, il a été attiré par la Terre et est entré en collision avec elle. L'impact, gigantesque, a éjecté une grande quantité de matière, qui a fini par s'agglomérer pour former la Lune.

Les points de Lagrange existent autour de toutes les planètes : pourquoi dans ce cas Vénus n'a-t-elle pas connu une histoire identique, bien qu'elle soit de grosseur comparable à la Terre ? D'une part, il faut qu'une quantité suffisante de matière s'aggrave aux points de Lagrange, d'autre part la collision avec la planète ne doit pas se faire n'importe comment, pour espérer éjecter suffisamment de matière en orbite et créer un gros satellite : les conditions nécessaires sont peut-être difficiles à obtenir.

Hélas, les exemples dans le Système Solaire restent trop limités pour pouvoir dire si ce processus est très rare dans la galaxie ou au contraire assez commun. Mais même si le caractère exceptionnel de la Lune dans le Système Solaire fait réfléchir, il ne faut pas le relier trop rapidement au développement « exceptionnel » de la vie sur Terre... Il n'existe aucun argument solide permettant de conclure que la vie intelligente a besoin d'une lune pour émerger sur une planète...



Enfin, pour que la composition chimique corresponde exactement à celle de la Terre, il faudrait que la proportion d'éléments lourds dans les autres systèmes planétaires soit identique : cette abondance est liée en partie à leur âge, mais aussi à la région de la galaxie dans laquelle ils sont nés. Cela concerne également les éléments très lourds et radioactifs comme l'uranium, qui produisent l'activité interne de la planète. Ces éléments ayant une durée de vie assez courte à l'échelle de l'Univers, leur proportion paraît encore plus dépendante de la région de la galaxie où les étoiles sont nées.

En pratique, ce sont les supernovæ qui créent ces atomes très lourds : si des supernovæ très violentes ont eu lieu dans le voisinage peu avant la formation d'un système planétaire, les planètes sont alors susceptibles d'avoir une activité interne bien plus forte que la Terre. À l'inverse, on peut imaginer des systèmes de « planètes mortes », démunies d'activité interne car trop pauvres en éléments radioactifs.

Finalement, les critères de sélection deviennent soudain beaucoup plus contraignants. Nous pouvons déjà diviser par dix pour éliminer les naines rouges, et encore par dix pour éliminer les étoiles doubles ou variables. De fait, sur les 50 étoiles les plus proches de la Terre, une seule est une naine jaune célibataire similaire au Soleil (il s'agit de « Tau Ceti », située à 12 années-lumière de distance). Il resterait donc un million de candidats planétaires.

Divisons encore par dix pour éliminer les planètes possédant trop peu (ou trop...) d'éléments lourds, et par dix pour ne garder que les planètes tournant sur elles-mêmes et situées exactement à la « bonne » distance de l'étoile (même intensité de rayonnement reçue que la Terre). Au passage, notre candidate la plus proche, Tau Ceti, vient d'être éliminée : en effet, elle est vieille de dix milliards d'années et possède sensiblement moins d'éléments lourds que le Soleil. Après ces coupes drastiques, il nous reste dix mille « planètes idéales » rien qu'au sein de notre galaxie...

Tous ces nombres sont évidemment extrêmement flous, et sans doute largement sous-estimés. Ils permettent toutefois d'avoir une première vision des choses sur la proportion d'environnements propices au développement d'une vie intelligente.

Sur les dix mille planètes restantes, l'évolution parfaitement identique de l'environnement a dû permettre les mêmes réactions chimiques que sur Terre, conduisant à des espèces de stabilité identique. Toutefois, des cataclysmes pourraient avoir eu lieu sur ces planètes, enrayant le développement de la vie : par exemple, l'explosion d'une supernova trop proche pourrait détruire les structures formées du fait des rayonnements émis. Ce type d'événement concernerait surtout les étoiles proches du cœur galactique, qui sont les plus nombreuses : cela restreindrait encore plus les candidates à l'émergence d'une vie intelligente.

Mais ce serait oublier que la Terre a elle-même connu des

cataclysmes tout le long de son Histoire, comme les impacts de comètes, formant dans l'atmosphère une couche de poussières absorbant la lumière solaire si indispensable à la vie... À chaque fois, la vie a beaucoup souffert, mais malgré la modification brutale et radicale de l'environnement, elle a toujours « rebondi » avec une grande rapidité. En effet, même si des structures sont détruites, d'autres finissent toujours par être reformées lorsque les conditions environnementales redeviennent favorables, car il s'agit de structures stables à long terme parmi un immense échantillon d'espèces formées chimiquement.

Ainsi, l'existence de cataclysmes ne semble pas être trop contraignante pour le développement de la vie, à condition qu'ils ne soient pas trop fréquents. Il est difficile de dire à ce jour si l'environnement proche du cœur galactique dépasse ce niveau critique d'hostilité, notamment à cause du grand nombre de supernovæ en jeu. Si c'était le cas, cela ne laisserait peut-être plus qu'une dizaine de « Terre » dans notre galaxie.

L'intelligence, une finalité exceptionnelle ?

Finalement, à supposer que la planète soit en tout point identique à la Terre, la vie y conduirait-elle à des êtres ressemblant à l'Homme et possédant une intelligence au moins égale ? Même si le développement des cellules n'y est pas parfaitement identique, il doit exister un certain nombre de points communs : comme nous l'avons vu, le couple cellule/molécule répliquante est d'une grande stabilité, et semble donc être un point de passage logique à conditions environnementales identiques. L'exploitation de la lumière de l'étoile en serait la source principale d'énergie, par le biais de la photosynthèse. Cela signifie que du dioxygène serait éjecté dans l'atmosphère, et finirait tôt ou tard par s'accumuler,

dans le cas d'une activité similaire à celle de la Terre.

L'adaptation des cellules à ce nouvel environnement les conduirait à développer de nouvelles structures, pour s'en protéger et pour l'utiliser : si l'idée d'un ADN ou d'une mitochondrie très différente est tout à fait envisageable, ces structures doivent néanmoins exister sous une forme ou sous une autre. L'énergie du dioxygène permettrait aussi d'établir d'autres structures complexes à l'intérieur de la cellule, pas forcément identiques à celles des cellules terrestres.

Finalement, de telles cellules extraterrestres pourraient être très différentes des cellules terrestres dans le détail, mais leur principe de fonctionnement serait identique : il serait basé sur une utilisation optimisée de l'énergie solaire et de l'énergie du dioxygène, garantissant une grande stabilité par le biais de la réplication.

La complexification de la vie accompagnerait l'augmentation du taux de dioxygène dans l'atmosphère, du fait même qu'il s'agit d'une source d'énergie constante facilitant les réactions chimiques. L'interaction entre cellules serait très grande car pour des structures ordonnées, il est plus simple d'utiliser d'autres structures ordonnées afin de se développer. Des organismes pluricellulaires émergeraient donc naturellement, comme cela a été plusieurs fois le cas sur Terre avant même l'explosion du Cambrien.

La vie serait ainsi de plus en plus capable de coloniser des environnements plus « difficiles », à commencer par les terres émergées. L'exemple des dorsales océaniques sur Terre montre que cette capacité d'adaptation peut aller très loin. Des organismes pluricellulaires finiraient donc par habiter les continents. À quoi ressembleraient-ils ? Il est difficile de le dire, mais la Nature essaierait de toute façon toutes les formes possibles, pour ne garder que celles qui sont viables.

L'exploitation optimisée de la lumière solaire conduirait à la formation de structures de grande surface et de faible épaisseur, telles que les feuilles terrestres : cela donnerait lieu à une « flore » extraterrestre. Certains végétaux tendraient naturellement à s'élever de plus en plus haut pour éviter l'ombre de leurs rivaux, grâce à l'ajout de structures plus solides : la hauteur maximale serait limitée par l'action de la pesanteur. L'équivalent de nos arbres dominerait ainsi le règne végétal.

L'exploitation optimisée du dioxygène donnerait plus de possibilités : d'une part, parce que c'est une énergie disponible jour et nuit, d'autre part parce qu'elle ne nécessite pas de déployer une grande surface particulièrement encombrante pour capter la lumière. Cela autoriserait la formation de structures complexes privilégiant un gros volume plutôt qu'une grande surface, capables ainsi de se déplacer par elles-mêmes. Cela serait un pas décisif, car elles pourraient alors chercher encore plus d'énergie auprès des autres organismes (nourriture), ce qui amplifierait encore leur développement. Les organismes basés sur l'utilisation du dioxygène finiraient ainsi par dominer naturellement le règne du vivant, de par leur mobilité, donnant naissance à une « faune » extraterrestre.

La recherche d'énergie dans la nourriture répondrait alors à une « stratégie » autrement plus avancée : en effet, si le dioxygène et la lumière solaire sont des énergies globales accessibles sans effort, la nourriture est une énergie plus localisée qu'il faut savoir aller chercher. La mobilité permet cela, mais il s'agit également d'un gouffre pompant énormément d'énergie : il s'agit d'optimiser l'utilisation du mouvement pour garantir la survie de l'espèce. C'est la raison pour laquelle le développement d'une intelligence de plus en plus poussée est une caractéristique nécessaire du monde animal.

Mènerait-elle à des êtres « d'intelligence humaine » ? Le

développement de l'intelligence étant un atout pour la survie de l'espèce, il paraît raisonnable de penser que les animaux extraterrestres puissent atteindre ce stade eux aussi. Ces extraterrestres pourraient donc être basés sur des cellules assez différentes, et pourraient avoir une anatomie très éloignée de celle des Terriens. Mais s'ils sont nés sur une planète de type terrestre, alors il s'agirait d'êtres mobiles axés sur l'exploitation du dioxygène et de la nourriture issue des animaux et des végétaux. La structuration extrême requise pour le développement de l'intelligence exclurait sans doute la perspective d'êtres microscopiques, mais leur taille pourrait néanmoins être très variable.

La faune et la flore, une dualité universelle ?

L'existence de deux grands types d'organismes macroscopiques sur Terre (les animaux et les végétaux) est liée à l'existence de deux sources majeures d'énergie : l'énergie de la lumière, et l'énergie du dioxygène. L'exploitation de ces deux sources requiert une morphologie bien distincte.

Pour capter un maximum de lumière, il faut un rapport surface/volume considérable, ce qui est obtenu grâce à l'existence de feuilles ou d'aiguilles. De plus, cette surface doit être « déployée » au grand jour.

Pour capter un maximum de dioxygène, il faut aussi une surface la plus grande possible, mais cette surface peut cette fois être repliée sur elle-même, puisqu'elle n'a pas besoin d'être exposée à la lumière. Cela donne lieu à des structures alvéolaires (poumons) ou feuilletées (mitochondries).

Finalement, les animaux peuvent se permettre de capter leur énergie dans des organes de petite taille grâce au repliement de la surface, alors que les végétaux doivent s'étendre le plus possible spatialement pour capter le maximum de lumière.

Cette morphologie « plus ramassée » des animaux leur permet d'acquérir la mobilité nécessaire pour aller chercher une source d'énergie supplémentaire : la nourriture. En fait, le besoin en matière organique caractérise officiellement le règne animal. Finalement, le règne animal domine nettement le règne végétal dans sa capacité à capter beaucoup d'énergie, mais en retour les animaux sont fortement dépendants des végétaux.

Sur une planète bénéficiant de lumière et de dioxygène, il faut s'attendre à une dualité similaire. Mais nous avons aussi imaginé une planète présentant toujours la même face vers son étoile, où une vie évoluée pourrait se passer de dioxygène : dans ce cas tout à fait hypothétique, la distinction entre la faune et la flore serait moins nette. Il n'est pas certain que des organismes tributaires de l'énergie lumineuse puissent acquérir la mobilité nécessaire pour aller chercher leur nourriture : il s'agirait alors peut-être d'un monde purement végétal...

Sommes-nous seuls ?

Récapitulons les perspectives de voir émerger de tels êtres extraterrestres intelligents. Selon le scénario pessimiste, les critères d'émergence sont extrêmement sévères, et seules quelques planètes dans la Galaxie sont alors concernées : il s'agit d'alter ego de la Terre, autorisant des mécanismes de développement de la vie totalement identiques. Les extraterrestres pourraient y être assez différents des humains, mais leur principe de fonctionnement de base serait identique.

« Quelques planètes concernées », c'est très peu : étant donné le flou dans lequel nous nous trouvons, il apparaît tout à fait possible qu'aucune planète dans la galaxie n'ait pu voir le développement d'une vie intelligente, en dehors de la Terre. Nous reviendrons bien sûr sur cette perspective dans la suite.

Même selon ce scénario pessimiste, le développement d'une vie extraterrestre primitive pourrait être assez commun. Il existe en effet un fossé immense entre une molécule complexe capable de se dupliquer par le biais d'une catalyse, et l'Homme ! Mais une telle vie primitive serait aussi nettement moins intéressante...

Il existe aussi un scénario plus optimiste, selon lequel seules certaines conditions générales sur l'environnement de la planète doivent être respectées pour que la vie s'y développe jusqu'à l'intelligence. Ces conditions seraient l'existence d'une source d'énergie puissante et stable, dans un environnement riche en eau

liquide et en molécules organiques susceptibles d'y réagir. De nouvelles perspectives s'ouvrent à nous : planètes telluriques orbitant autour de naines rouges, d'étoiles doubles ou d'étoiles variables, planètes plus éloignées de leur étoile que la Terre, voire même gros satellites de géantes gazeuses ayant migré en direction de l'étoile... Les environnements favorables au développement d'une vie intelligente se compteraient alors en dizaines de millions, rien que dans notre galaxie ! Quant aux formes d'intelligence obtenues, elles seraient sans doute extrêmement variées, et bien difficiles à imaginer pour les Terriens ignorants que nous sommes...

On le voit, l'état des connaissances aujourd'hui laisse ouvertes des perspectives très variées... Mais il semble tout de même qu'une idée forte se dégage : le fait que d'autres vies intelligentes aient pu émerger au sein même de notre galaxie est une hypothèse qui n'est pas du tout farfelue, et qui semble même très raisonnable ! C'est pourquoi beaucoup d'astronomes pensent que nous ne sommes pas seuls dans la galaxie...

L'équation de Drake

Les raisonnements précédents permettant d'estimer le nombre de planètes capables de développer une civilisation technologique sont résumés simplement par une célèbre équation mathématique appelée « équation de Drake », du nom de l'astronome qui l'a mise en avant en 1961. Elle s'écrit simplement :

- N est le nombre de civilisations extraterrestres dans notre galaxie avec qui nous pourrions entrer en contact.
- n_e est le nombre d'étoiles naissant chaque année dans notre galaxie.
- f_p est la fraction de ces étoiles possédant des planètes.
- n_p est le nombre de planètes par étoile propices à la vie.
- f_v est la fraction de ces planètes où la vie apparaît effectivement.
- f_i est la fraction de ces planètes sur lesquelles émerge une vie intelligente.

- f_c est la fraction de ces planètes abritant des civilisations souhaitant et pouvant communiquer avec nous.
- T est la durée de vie moyenne d'une civilisation.

Cette équation permet à chacun de construire sa propre estimation du nombre de civilisations dans la galaxie, en choisissant comme il l'entend la valeur des différents paramètres de cette équation. Le problème est que trois paramètres sont particulièrement incertains : f_v , f_i et T . De plus, si on considère qu'une civilisation a une durée de vie supérieure à quelques dizaines de milliers d'années, alors cela implique qu'elle a eu le temps de coloniser toute la galaxie, ce qui soulève aussitôt une question supplémentaire : s'ils sont omniprésents, pourquoi ces extraterrestres semblent-ils si discrets à nos yeux ? C'est la question qui va nous occuper dans la suite.

Les contraintes du voyage interstellaire

Afin de préciser les possibilités d'existence d'une civilisation technologique, il est temps de se remettre en tête quelques chiffres éloquentes. À partir du moment où le taux de dioxygène a été suffisant dans l'atmosphère, il a fallu environ 500 millions d'années pour que les animaux se développent jusqu'à l'Homme. L'Homme lui-même n'est apparu qu'il y a 2,5 millions d'années environ : cela représente 0,5 % de la durée d'évolution du règne animal. Autant dire qu'il est né hier... L'Homme moderne, à l'intelligence sensiblement plus développée, a émergé quant à lui il y a deux cent mille ans environ : il appartient donc aux derniers pourcents de l'Histoire humaine.

L'Homme a connu la « révolution néolithique » il y a environ 11 000 ans, prélude à l'apparition des premières « civilisations » : cela correspond à nouveau aux derniers pourcents de l'évolution de l'Homme moderne. La grande majorité des connaissances actuelles a été engrangée dans les deux derniers siècles (XIX^e et

XX^e siècle), soit dans les derniers pourcents de l'Histoire des civilisations. Même si on imagine que les progrès ralentissent à l'avenir, il ne faudra pas plus de quelques centaines ou milliers d'années pour que l'Homme maîtrise le voyage interstellaire habité (sauf catastrophe d'ici là, bien entendu...).

En d'autres termes, à partir du moment où une vie intelligente émerge, ses capacités de colonisation vers d'autres planètes peuvent apparaître de façon quasi instantanée par rapport à la durée de vie de leur planète.

Les voyages interstellaires n'en restent pas moins limités par certaines lois physiques : notamment, il est impossible de dépasser la vitesse de la lumière. Comme l'étoile la plus proche est à 4,2 années-lumière, cela signifie qu'il faut nécessairement plus de 4,2 années pour l'atteindre. Quant à un voyage menant d'un bout à l'autre de notre galaxie, il durerait quatre-vingt mille ans...

Les difficultés que posent de tels voyages sont multiples. Avant toute chose, il faut bien sûr disposer d'un mode de propulsion autonome très puissant, ce qui nécessite de transporter une quantité d'énergie qui nous paraît démentielle aujourd'hui. Pour voyager à cent mille km/s (trois fois moins vite que la lumière), avec un vaisseau d'une centaine de tonnes, il faudrait à peu près l'énergie d'une centrale nucléaire fonctionnant en continu pendant dix mille ans ! Si cela semble énorme de nos jours, il n'est pourtant pas exclu que de telles énergies puissent être atteintes dans un avenir encore lointain, par exemple grâce à la fusion nucléaire.

Hélas, même avec une maîtrise de la fusion nucléaire, la quantité de carburant à emporter serait démentielle, ce qui augmenterait considérablement la masse du vaisseau : or plus la masse augmente, plus la quantité d'énergie nécessaire pour l'accélérer est élevée. En d'autres termes, toute l'énergie du carburant servirait à

accélérer le carburant... C'est d'ailleurs le cas des fusées actuelles, dont le carburant constitue l'essentiel de la masse : en quelque sorte, le carburant contient à peine assez d'énergie pour se soulever lui-même...

Le problème est bien plus critique pour un vaisseau interstellaire que pour une fusée. Il serait indispensable de trouver un carburant possédant une très grande densité d'énergie (c'est-à-dire beaucoup d'énergie contenue dans une faible masse). L'antimatière pourrait par exemple jouer ce rôle.

L'antimatière

Toute particule de matière possède un alter ego de même masse mais de charge opposée. Par exemple, un atome d'hydrogène est constitué d'un électron et d'un proton, tandis qu'un atome « d'anti-hydrogène » est constitué d'un anti-électron (appelé positron) et d'un anti-proton.

L'antimatière est quasiment absente de l'Univers, ce qui est plutôt une bonne nouvelle : en effet, toute particule de matière a la propriété de s'annihiler avec son antiparticule lorsqu'elles entrent en contact. Elles se transforment alors intégralement en rayonnements de très grande énergie (photons gamma), et toute masse disparaît lors de l'opération.

Ainsi, cette réaction permet de déployer toute l'énergie de masse $E = mc^2$ en énergie de rayonnement exploitable par un vaisseau spatial : c'est la plus grande densité d'énergie par unité de masse qu'on puisse imaginer à ce jour ! Un réservoir d'antimatière permettrait donc de transporter une quantité d'énergie inouïe tout en n'augmentant pas trop la masse du vaisseau...

À quoi pourraient donc ressembler les infrastructures nécessaires à la construction d'un vaisseau spatial ? Sur le très long terme, Jupiter pourrait constituer la principale source d'énergie primaire, grâce à l'abondance de son deutérium (il s'agit d'un isotope de l'hydrogène dont on peut extraire assez « facilement » l'énergie nucléaire par fusion) : la réalisation d'un tel vaisseau nécessiterait donc une infrastructure lourde à l'échelle du Système Solaire,

incluant notamment la construction d'une base sur l'une des lunes de Jupiter. Des centrales à fusion se chargeraient d'y libérer l'énergie nucléaire du deutérium, avant qu'elle soit convertie en antimatière dans des accélérateurs de particules, permettant d'obtenir le « carburant ultra-concentré » nécessaire.

Plusieurs centaines à milliers d'années devront probablement s'écouler avant de pouvoir envisager un projet de cette envergure. D'ici là, des bases humaines se seront sans doute déjà bien développées sur la Lune, sur Mars, et ailleurs dans le Système Solaire. Si ces perspectives appartiennent résolument à la science-fiction, il faut bien comprendre qu'un tel vaisseau interstellaire reste tout à fait envisageable au regard des lois de la physique.

L'énergie d'un vaisseau interstellaire

On donne ci-dessous quelques exemples de densité d'énergie en fonction du carburant emporté (les unités sont en gigajoules par kilo) :

- Propergols (énergie chimique) : 0,01
- Uranium (énergie nucléaire libérée par fission) : 10 000
- Deutérium (énergie nucléaire libérée par fusion) : 40 000
- Antimatière (énergie de masse) : 100 000 000

L'énergie chimique utilisée dans les fusées actuelles fait pâle figure devant l'énergie nucléaire. Mais la difficulté à libérer cette énergie doit aussi être prise en compte : ainsi des installations massives doivent être mises en place pour exploiter l'énergie nucléaire, ce qui limite pour l'instant ses applications à la propulsion des navires et des sous-marins.

Par ailleurs, l'avantage de la fusion par rapport à la fission réside surtout dans l'abondance du deutérium sur Terre, par rapport à celle de l'uranium : à consommation constante, les réserves d'uranium sont estimées à 140 ans, tandis que celles de deutérium (contenues dans l'eau de mer H_2O) doivent durer plusieurs centaines de milliers d'années. De plus, les réserves de deutérium sur les géantes gazeuses telles que Jupiter sont tout simplement infinies à l'échelle humaine.

L'antimatière combine quant à elle tous les avantages dans la propulsion spatiale, puisqu'elle possède une densité d'énergie indépassable, qui peut

être libérée sans effort. En revanche, l'antimatière n'existe pas à l'état naturel et il faut donc dépenser une quantité gigantesque d'énergie pour la créer : il s'agit d'un « vecteur d'énergie », et non d'une « source d'énergie ». En d'autres termes, l'énergie du vaisseau spatial doit être intégralement créée à partir des sources naturelles d'énergie telles que le deutérium.

À ce jour le rendement énergétique pour la création d'antimatière est d'un cent-millionième, c'est-à-dire qu'il faut cent millions de Joules pour créer un Joule d'antimatière : c'est ce qui interdit la production massive d'antimatière aujourd'hui. Ces rendements pourraient toutefois sensiblement augmenter à l'avenir.

Ainsi, à très long terme, le deutérium pourrait devenir la source d'énergie par excellence de l'Humanité, du fait de son abondance, et l'antimatière le vecteur d'énergie idéal pour la propulsion spatiale.

Vaincre le temps

Supposons les différentes contraintes technologiques liées à la construction d'un vaisseau interstellaire résolues. Les durées de voyage seraient au minimum de plusieurs dizaines d'années : cela semble être une contrainte extrêmement forte pour les voyageurs... Or si la science-fiction met volontiers en avant la mise en hibernation, il n'est pas évident que cette « astuce » puisse être appliquée facilement à l'Homme : dans le domaine de la biologie, les inconnues restent plus grandes encore que dans le domaine de la technologie.

En revanche, il est envisageable que des périodes de sommeil de très longue durée soient imposées aux passagers. De plus, les lois de la physique donnent une autre solution « naturelle » à ce problème. En effet, l'écoulement du temps est modifié au fur et à mesure qu'on s'approche de la vitesse de la lumière. Ainsi, un voyage qui dure cent ans du point de vue d'une personne restée sur Terre peut durer seulement quelques minutes du point de vue du passager : plus la vitesse est proche de celle de la lumière, plus cet écart devient important.

Pour le voyageur, la durée d'un voyage n'est alors plus contrainte que par le temps nécessaire pour accélérer, puis pour décélérer : entre les deux, quand la vitesse de la lumière est presque atteinte, la durée du voyage peut être réduite autant que nécessaire...

L'accélération est limitée par la perspective d'être écrasé à l'arrière de la fusée lors de cette phase : pour que le passager ne pèse pas plus lourd que sur Terre dans la fusée, il faut que la durée d'accélération soit d'au minimum un an. Il en va de même pour la phase de décélération.

Ainsi, quelle que soit la destination, la durée d'un voyage serait largement supérieure à deux ans du point de vue du passager. Du point de vue du Terrien, elle serait égale à la distance parcourue exprimée en années-lumière, à laquelle il faudrait ajouter le temps d'accélération et de décélération : elle serait donc de l'ordre de plusieurs dizaines d'années pour les voyages les plus « locaux ».

Terminons cet aperçu des voyages interstellaires par quelques perspectives plus « exotiques ». Pour éviter que les passagers ne soient écrasés à l'arrière du vaisseau au cours de l'accélération, il faudrait une force qui les pousse vers l'avant : cela passe par des particules capables d'exercer une force gravitationnelle très puissante, tout en ayant une faible inertie pour que le vaisseau ne soit pas plus difficile à accélérer...

La durée des phases d'accélération et de décélération pourrait alors être considérablement réduite. À condition d'y consacrer suffisamment d'énergie, le voyage interstellaire deviendrait ainsi aussi court que possible du point de vue du passager : celui-ci pourrait sauter d'étoile en étoile en quelques jours, comme si la limitation de la vitesse de la lumière n'existait pas... Ce voyage n'en semblerait pas moins interminable du point de vue d'une personne restée sur Terre, qui mourrait de vieillesse avant de recevoir des nouvelles de l'arrivée du vaisseau...

Peut-être un jour arrivera-t-on à contourner définitivement cette

terrible limitation dans les vitesses de transport : ce serait le cas par exemple s'il existait des « Univers parallèles » accessibles grâce à de gigantesques densités d'énergie... Nous atteignons là les limites les plus extrêmes de la science-fiction : le but était de rappeler que beaucoup de choses restent sans doute à découvrir encore aujourd'hui, notamment en ce qui concerne le monde des particules. Ainsi, il est impossible d'imaginer à quoi pourraient ressembler les technologies dans un millénaire (c'est-à-dire dans une minute à l'échelle de vie d'une planète !).

Les trous noirs, des portes dimensionnelles ?

La Relativité Générale nous indique que l'espace-temps se « courbe » en présence d'objets massifs tels que des étoiles ou des planètes, un peu à l'instar d'un tapis élastique sur lequel seraient posés des objets. C'est cette courbure qui provoque géométriquement ce que l'on perçoit comme « la force gravitationnelle ».

Plus un objet est dense, plus « le tapis s'enfonce profondément » au-dessous de lui : ainsi au niveau d'une étoile à neutrons, l'espace-temps s'apparente à un véritable « gouffre ». La situation est pire encore dans le cas d'un trou noir : nous avons vu que selon les connaissances actuelles en physique, toute la masse est censée y être concentrée en un seul point de l'espace. La densité de matière y est donc infinie, et le « gouffre » créé par le trou noir a alors une profondeur infinie.

Or l'espace-temps étant capable de se courber, nous pourrions imaginer un Univers qui se replierait sur lui-même, de même que la surface de la Terre se replie sur elle-même pour former une sphère. Le gouffre d'un trou noir finirait alors par émerger en un autre endroit de l'Univers, de même qu'en creusant un tunnel vertical sur Terre, on finirait par réémerger aux antipodes.

Cette perspective a été énormément « exploitée » par les auteurs de science-fiction, car elle offre la possibilité de passer presque instantanément d'un point à l'autre de l'univers (on parle de « trou de ver »)... Hélas, c'est un pur fantasme.

À supposer que l'Homme puisse créer un grand trou noir à proximité de la Terre, n'importe quel objet ou individu serait écartelé par les forces de marée bien avant de pouvoir franchir l'horizon du trou noir.

De plus, le voyage serait certes très rapide du point de vue du voyageur,

mais pas du point de vue d'une personne restée sur Terre, en raison du phénomène de dilatation des temps : on retrouve la même problématique que dans le cas d'un vaisseau spatial interstellaire « traditionnel »...

Par ailleurs, les observations tendent à indiquer que l'Univers est particulièrement plat, tout du moins dans les limites de l'horizon observable. Le fait de « creuser un simple trou » par le biais d'un trou noir ne mènerait alors nulle part.

Enfin, il est impossible de savoir ce qui se passe à l'intérieur d'un trou noir, puisque aucune information ne peut en sortir : il est tout à fait possible que la matière stoppe sa contraction avant de former une singularité gravitationnelle, par un processus physique à l'échelle des particules encore inconnu. Le « gouffre » créé serait alors certes très profond, mais pas infini, à l'instar de celui d'une étoile à neutrons.

Le paradoxe de Fermi

Restons « raisonnables », donc focalisés sur les connaissances de notre époque. Cela exclut les particules exotiques, les univers parallèles et les possibilités d'hibernation... Malgré ces limitations, les voyages interstellaires n'en restent pas moins physiquement accessibles à l'être humain, à condition d'être capable de domestiquer des énergies colossales.

Si une civilisation extraterrestre existe, elle a toutes les chances d'avoir atteint ce stade : rappelons en effet que les échelles de temps nécessaires à un tel développement technologique sont totalement négligeables par rapport l'évolution biologique de l'espèce humaine. Il paraît alors raisonnable de penser qu'une telle civilisation utiliserait cette capacité à voyager, ne serait-ce que pour garantir la survie de l'espèce.

Cette civilisation choisirait prioritairement des planètes dont l'environnement lui est favorable : si cette civilisation est née sur une planète de type terrestre (ce qui est l'hypothèse la plus « raisonnable »), elle doit donc choisir des nouvelles « Terre » pour développer des « colonies ». En particulier, ces planètes doivent posséder du dioxygène dans leur atmosphère : dans l'état

de nos connaissances, cela implique que la vie doit exister depuis assez longtemps sur ces planètes à conquérir. Cela restreint de façon notable les candidates dans la galaxie.

Tôt ou tard, une telle civilisation doit découvrir l'existence de notre Terre, qui doit lui apparaître comme plutôt accueillante puisque similaire à la planète mère. Il paraîtrait alors surprenant qu'une telle civilisation délaisse la Terre au cours de la « colonisation » de la galaxie.

Pourtant, le fait est qu'aucun indice d'une civilisation extraterrestre n'apparaît dans les roches témoignant du passé de notre planète. Or le dioxygène est en proportion à peu près constante dans l'atmosphère depuis plus de 500 millions d'années : c'est une durée considérable à l'échelle d'une civilisation. Malgré cela, parmi toutes les hypothétiques civilisations de la galaxie semblables à la nôtre, aucune n'a choisi de s'installer « chez nous » pendant tout ce temps.

Ce paradoxe est encore renforcé si on s'intéresse à des échelles encore plus grandes. En effet, restreindre l'étude à notre seule galaxie est très réducteur.

La galaxie d'Andromède, qui est la grande galaxie la plus proche de la nôtre, se trouve à environ 2,5 millions d'années-lumière. Cette distance peut sembler très élevée : cela signifie qu'un voyage spatial entre deux galaxies durerait quelques millions d'années. Mais cela n'est pas pour autant hors de portée du voyageur : d'une part comme nous l'avons vu, le voyage paraît beaucoup plus court pour les passagers si la vitesse est très proche de celle de la lumière. D'autre part, le trajet pourrait se faire en plusieurs étapes, et l'expansion pourrait se poursuivre de proche en proche en profitant de la présence d'étoiles « vagabondes » entre les galaxies.

Par ailleurs, « quelques millions d'années », ce n'est rien par

rapport aux 500 millions d'années écoulées sur Terre depuis « l'explosion » du Cambrien. Cela signifie que nous aurions tout autant pu recevoir une visite d'extraterrestres venus des galaxies voisines !

Notre galaxie fait partie d'un gigantesque groupe de galaxies appelé « superamas de la Vierge », dont la taille est d'environ 200 millions d'années-lumière. Toutes les civilisations nées dans ce superamas auraient donc eu le temps de s'étendre d'étoile en étoile et de galaxie en galaxie, jusqu'à atteindre notre Terre.

Or le superamas de la Vierge contient environ dix mille galaxies ! Si on récapitule, cela fait dix mille galaxies contenant des milliards voire des centaines de milliards d'étoiles, dont beaucoup possèdent des systèmes planétaires. Est-il vraiment possible qu'avec plusieurs milliards d'années à sa disposition, la vie intelligente n'ait pu naître qu'à un seul endroit, sur Terre ? L'hypothèse paraît décidément de plus en plus anthropocentrique, en faisant de notre existence un cas bizarrement unique... Elle en devient quelque peu suspecte.

C'est le célèbre « paradoxe de Fermi », du nom du physicien d'origine italienne Enrico Fermi qui le formula. Il pose ainsi cette redoutable énigme : « Si une civilisation technologique s'est un jour développée dans notre galaxie ou dans une galaxie voisine, elle aurait dû s'étendre jusqu'à la Terre, et notre planète devrait donc garder les traces d'une présence extraterrestre actuelle ou passée. Or il n'existe sur Terre aucun indice d'une telle civilisation ``galactique". »

Pour le résoudre, deux possibilités :

- Soit nous concluons que la vie intelligente est tellement difficile à créer que nous en sommes le premier et le seul représentant à des centaines de millions d'années-lumière à la ronde. Hypothèse possible, mais quelque peu suspecte comme nous l'avons vu.

- Soit nous trouvons des explications justifiant que les extraterrestres aient délaissé la Terre et se « cachent » à nos yeux. C'est cette deuxième voie que nous allons étudier pour l'instant, afin de voir si les arguments sont tenables.

L'Univers observable

L'âge de l'Univers est estimé à 14 milliards d'années. Or la lumière d'un objet lointain met du temps avant de nous parvenir : si cet objet se trouve à une année-lumière, la lumière que nous voyons aujourd'hui a été émise il y a un an. De même si l'objet se trouve à 14 milliards d'années-lumière de distance, nous le voyons tel qu'il était il y a 14 milliards d'années, puisqu'il a fallu tout ce temps à sa lumière pour arriver jusqu'à nous. « Plus on regarde loin dans l'espace, plus on regarde loin dans le temps ».

Il s'ensuit une conséquence importante : il est impossible de voir des objets situés à plus de 14 milliards d'années-lumière, puisque cela reviendrait à voir des objets existant avant le Big Bang, c'est-à-dire avant « l'apparition » de l'espace-temps et de son contenu... Finalement, l'Univers observable est une bulle de 14 milliards d'années-lumière de rayon centrée sur nous. L'Univers s'étend peut-être à l'infini au-delà, mais nous n'avons aucun moyen de le vérifier.

Notons au passage que si l'Univers est infini et s'étend à l'identique dans toutes les directions, alors l'existence d'une vie extraterrestre intelligente devient une certitude... Mais c'est sans intérêt : si une civilisation née il y a 1 milliard d'années se trouve à 100 milliards d'années-lumière de nous, nous ne pourrions la détecter que dans 99 milliards d'années...

En se restreignant à l'Univers observable, les galaxies sont agencées en amas et en superamas. À plus grande échelle en revanche, les superamas semblent s'agencer en « filaments » plutôt qu'en « super-superamas », mais ces structures gigantesques restent très méconnues.

Le nombre de galaxies dans l'Univers observable est estimé à 80 milliards, et elles contiennent en moyenne quelques centaines de milliards d'étoiles chacune : il paraîtrait pour le moins étrange que nous soyons seuls parmi cette quantité inimaginable de systèmes planétaires. En particulier, les civilisations situées à moins d'un milliard d'années-lumière devraient avoir eu le temps de voyager jusqu'à notre galaxie et jusqu'à la Terre. À partir de là, notre apparente solitude dans le Système Solaire soulève des questions qu'il est impossible d'ignorer...

L'intelligence et la technologie sont-elles liées ?

Le premier argument est le suivant : une vie intelligente doit-elle nécessairement conduire à une civilisation technologique ? On pourrait imaginer des êtres intelligents satisfaits de leur environnement naturel, et ne cherchant pas à fabriquer d'outils pour améliorer leur quotidien. Une telle civilisation ressemblerait alors davantage aux peuples terrestres dits « primitifs », et ne serait pas une manifestation d'une « intelligence inférieure ».

Il faut toutefois noter que si l'intelligence s'est développée chez les animaux, c'est pour obtenir le plus efficacement possible l'énergie contenue dans la nourriture, en dépensant le moins d'énergie possible. C'est ce qui a poussé les civilisations égyptiennes ou sumériennes à contrôler l'environnement au moyen d'outils de plus en plus perfectionnés : meilleure mise en valeur des terres, meilleure défense des régions fertiles, nécessitant un transport perfectionné des régions riches en minerais vers les régions agricoles, etc.

Ainsi, les technologies qui ont pris leur essor dans les premières civilisations urbaines ont été la continuité logique de la stratégie du vivant, consistant à exploiter au mieux l'énergie de l'environnement pour fonctionner et assurer la reproduction. Aujourd'hui encore, l'exploitation de l'énergie naturelle reste l'une des applications majeures de l'intelligence humaine, avec toutes les manifestations associées : industries pour exploiter ces ressources, guerres pour les défendre ou les contrôler, commerce pour optimiser leur production à l'échelle mondiale, etc.

Aujourd'hui, beaucoup de technologies semblent dédiées plus simplement au « confort », et non plus à des besoins primaires de l'Homme en tant « qu'animal ». Mais la plupart des « petits plaisirs » cachent des besoins plus primitifs génétiquement

enracinés en nous. Par exemple, si tout le monde préfère le « beau temps » à la pluie, c'est parce que les pertes d'énergie sont beaucoup plus considérables par temps de pluie : l'énergie thermique du corps est perdue bien plus rapidement au contact de l'eau que de l'air.

Pourtant, ces pertes d'énergie peuvent être facilement compensées aujourd'hui, au moyen d'une nourriture et d'un chauffage bon marché. Mais il n'en reste pas moins que ce besoin « avide » d'énergie reste inscrit au fond de nous, et pilote beaucoup de nos actions sans que nous ne nous en rendions compte.

Cela conduit naturellement à une société où l'inactivité devant la télé est reine (dépense d'énergie minimale), et où les politiques en viennent à suggérer de manger moins (acquérir moins d'énergie) et à faire plus de sport (dépenser plus d'énergie).

Les besoins en contacts sociaux sont aussi issus de cette même stratégie naturelle : primitivement, un groupe acquiert et défend beaucoup plus facilement l'énergie dont il a besoin qu'un individu isolé. C'est d'ailleurs l'une des grandes voies qu'a prise l'intelligence animale au cours de son évolution. Quant au plaisir de la reproduction, son origine animale est sans doute la plus évidente...

En d'autres termes, les comportements présents dans nos sociétés actuelles sont une conséquence logique et peut-être inéluctable des lois de la Nature : l'intelligence est apparue parce qu'elle optimisait l'acquisition de l'énergie indispensable au vivant. Le développement de technologies en est alors une conséquence directe : il ne s'agit que d'une étape supplémentaire menant au plaisir de l'individu, ce plaisir étant inconsciemment piloté par les besoins de l'espèce.

Quant aux sociétés qui ont été historiquement plus « lentes » technologiquement, ce retard est lié à un environnement naturel moins favorable, et non à un manque de volonté. Pour ne parler

que de l'Occident, l'existence d'un croissant fertile et la proximité optimale de fleuves irriguant des déserts ont été des environnements exceptionnels, encourageant un développement technologique plus rapide. Celui-ci s'est ensuite transmis à la Grèce, puis à Rome, puis à l'Europe, de proche en proche.

Finalement, la « technologie » a fini par se transmettre auprès de la plupart des civilisations, et ce quelle que soit leur culture : seule une poignée de peuples n'éprouve pas le désir d'en bénéficier aujourd'hui. Cette expansion universelle par-delà les divergences culturelles confirme que le développement de technologies est un besoin fort de la vie intelligente.

Bien sûr, on peut imaginer une civilisation extraterrestre qui choisirait de rester définitivement à « l'état sauvage ». Mais cela paraît en contradiction avec les causes naturelles donnant naissance à l'intelligence. Aussi paraît-il raisonnable de penser que beaucoup de civilisations extraterrestres se développeraient jusqu'à pouvoir quitter leur planète.

La volonté de colonisation est-elle universelle ?

Nous en arrivons au deuxième argument possible pouvant expliquer le paradoxe de Fermi : une civilisation technologique extraterrestre chercherait-elle vraiment à essaimer sur d'autres planètes ? Nous avons mis en avant la volonté de garantir la survie de l'espèce : une vie intelligente localisée sur une seule planète connaît en effet des risques considérables de cataclysme planétaire qui l'éradiquerait. Celui-ci peut être dû à une catastrophe interne (guerre ou accident de portée planétaire), ou externe (comète, supernova...). Mais cet argument ne justifie pas de coloniser toute une galaxie : deux ou trois planètes assez distantes suffisent !

En revanche, il existe une deuxième motivation possible à la colonisation : le fait que la planète mère atteigne une population très importante. Qu'une civilisation soit avancée ou pas, elle ne peut subsister qu'en utilisant les ressources de son environnement. Même si ces ressources sont renouvelables et que ces êtres intelligents entretiennent un cycle immuable, il existe toujours une limite à partir de laquelle davantage de population implique moins de ressources pour chacun.

Par exemple sur Terre, la superficie limitée de terres arables ou la quantité limitée d'eau douce peut créer un tel « stress ». Cela n'est pas forcément un frein à l'augmentation de population : ainsi, les terres peuvent produire de plus en plus grâce à de meilleurs engrais, et l'eau douce peut être créée à partir de l'eau de mer. Mais cela crée naturellement un besoin de partir là où on peut trouver autant de terres arables et d'eau douce que nécessaire.

Cela explique que l'Humanité ait rapidement colonisé toutes les terres du globe, et ce sans même le vouloir : la vie privilégie naturellement les endroits aux ressources abondantes plutôt que ceux aux ressources limitées. À partir du moment où la population dépasse localement un certain seuil, l'abondance accessible à chacun se déplace ailleurs.

Une civilisation extraterrestre dépasserait-elle ce seuil à l'échelle d'une planète, ce qui la pousserait à en coloniser une autre ? C'est clairement le cas de l'Humanité sur Terre : la perspective de terres fertiles sur une autre planète attirerait certainement beaucoup de monde, parce que l'abondance supérieure des ressources y autoriserait une vie « plus facile ».

On pourrait imaginer que le renouvellement d'une civilisation extraterrestre soit suffisamment limité pour maintenir la population à un niveau démographique très bas. Mais si aucune civilisation n'a jamais colonisé la galaxie, cela signifie que le niveau de population est resté partout très faible, et ce sur des

échelles de plusieurs centaines de millions d'années ! Cette hypothèse paraît véritablement improbable, d'autant que l'Humanité sur Terre montre l'exemple inverse. Enfin, n'oublions pas que c'est dans la nature même de la vie de se répliquer...

Finalement, la motivation à la colonisation paraît inéluctable ou en tout cas naturelle, même si on imagine des êtres mentalement très différents de l'Homme. Cela est dû tout simplement au fait que la vie préfère l'abondance à la rareté pour se développer.

Or le scénario se renouvelle sur chaque nouvelle planète colonisée : la population finit un jour ou l'autre par dépasser un seuil tel qu'elle ressent le besoin de s'échapper vers une nouvelle planète vierge, offrant davantage à chacun. Ainsi, par sauts de puce, une civilisation technologique finit par coloniser des planètes de plus en plus lointaines.

Cette évolution est exponentielle : plus la civilisation habite un grand nombre de planètes, plus elle tend à coloniser de nouvelles planètes à partir des différentes planètes mères. Un million d'années paraît alors largement suffisant pour coloniser une galaxie entière, sans pour autant qu'il y ait une volonté première de coloniser cette galaxie.

Bien sûr, on peut toujours imaginer une civilisation technologique qui, pour une raison ou pour une autre, choisirait de rester définitivement sur sa planète originelle. Mais cela est peu probable pour toutes les civilisations nées au sein des dix mille galaxies qui nous entourent depuis les origines de l'Univers... D'autant que notre propre civilisation s'empresserait d'amorcer la colonisation interstellaire si elle le pouvait, de même qu'elle a très tôt colonisé l'ensemble du globe : qu'elle soit la seule à avoir jamais eu cette idée paraîtrait pour le moins suspect...

Dès que le processus de colonisation interstellaire s'amorce, il s'emballe de façon exponentielle : si nous ne sommes pas la seule vie intelligente à des centaines de millions d'années-lumière à la

ronde, alors cela signifie que nous sommes au cœur d'une civilisation galactique vieille de plusieurs centaines de millions d'années, sans même que nous nous en apercevions...

Le commerce, une invitation au voyage

La civilisation s'est bâtie autour des ressources naturelles (secteur primaire), et a développé une industrie pour mieux les exploiter ou les défendre (secteur secondaire). Comme tout ne pouvait pas être produit sur place, il a aussi fallu développer le commerce pour mettre toutes ces richesses en relation (secteur tertiaire).

De ces trois secteurs, c'est le tertiaire qui domine nettement dans les sociétés les plus « avancées ». Mais l'importance du commerce n'est pas neuve : historiquement, c'est presque toujours le commerce qui a poussé à l'exploration, bien plus que la recherche de nouvelles terres agricoles.

Cela explique que la Chine ait très peu contribué à la découverte et à la colonisation de nouvelles terres, bien que sa puissance ait longtemps été équivalente à celle de l'Occident : la Chine était une civilisation isolée entourée de peuples « barbares », très à l'écart des réseaux commerciaux de la Méditerranée et de l'Océan Indien. Ainsi était-elle davantage centrée sur elle-même qu'ouverte sur d'autres horizons.

De même, c'est bien le commerce avec l'Asie qui a poussé Christophe Colomb à ouvrir une nouvelle voie vers l'ouest, et non la recherche de nouvelles terres. À ses débuts, le continent américain était surtout vu comme un obstacle gênant sur la route des Indes, et les efforts restaient focalisés sur les possibilités de franchir cet obstacle : ils trouvèrent leur conclusion dans l'exploit de Magellan. Ce n'est qu'ensuite, une fois jugée trop longue la route de l'ouest vers les Indes, que les richesses du continent américain nous apparurent désirables.

La motivation serait probablement identique aujourd'hui : c'est assurément la présence d'une civilisation extraterrestre autour d'une autre étoile qui motiverait le développement d'un vaisseau interstellaire. La découverte d'une terre vierge au lieu d'une civilisation avancée serait probablement une déception : il y a plus d'argent à retirer du commerce avec une autre civilisation que de l'exploitation de nouvelles terres agricoles...

Pourtant, la colonisation de cette planète vierge serait amorcée tôt ou tard de par l'abondance de ses ressources ; et peut-être un jour finirait-elle par devenir plus riche que la Terre elle-même...

La Terre, réserve naturelle protégée...

Pourquoi une telle civilisation galactique aurait-elle délaissé la Terre, au point d'éviter tout contact avec elle ? Une réponse assez classique consiste à dire que les extraterrestres ne veulent pas intervenir dans l'évolution de l'Humanité, pour ne pas introduire de déséquilibre par l'introduction brutale de nouvelles technologies.

En effet, les schémas culturels d'une civilisation sont adaptés à son avancement technologique : il est donc important de laisser le temps à la culture d'évoluer en parallèle de son développement matériel. Imaginons une société primitive habituée à des conflits entre tribus : si elle disposait soudain de moyens de transports rapides, et d'armes de destruction massive (en l'occurrence des fusils...), il est probable que chaque tribu en profiterait pour asseoir plus facilement sa domination sur les autres, ce qui conduirait à une guerre dévastatrice. Ainsi, le système tribal (petite échelle spatiale et humaine) n'est assurément pas adapté aux technologies modernes, trop efficaces.

De même, si des « technologies extraterrestres » venaient brutalement jusqu'à nous, cela pourrait entraîner des pratiques autodestructrices. Les extraterrestres préféreraient alors ne pas se manifester jusqu'à ce que nous maîtrisions nous-mêmes le voyage interstellaire.

Toutefois, cet argument ne tient pas pour une raison simple : l'Humanité n'est sur Terre que depuis 2,5 millions d'années, ce qui n'est rien à l'échelle de temps d'une planète. Or la Terre est habitable depuis plus de 500 millions d'années, avec un taux de dioxygène et d'ozone à peu près constant : pourquoi diable les extraterrestres ne l'ont-ils pas colonisée, pendant toute cette période où la vie intelligente y était absente ? Aucun « choc » de

civilisation ne se serait alors produit...

On est alors obligé d'admettre que la civilisation galactique laisse intacte toute planète potentiellement capable de développer une vie intelligente autochtone. Mais plusieurs paradoxes apparaissent aussitôt.

Le premier, c'est que les planètes capables de développer une vie intelligente sont précisément celles dont l'environnement est le plus favorable pour accueillir une vie intelligente extraterrestre. Par exemple, l'Humanité chercherait avant tout un alter ego de la Terre pour s'installer, possédant du dioxygène dans son atmosphère, donc abritant la vie. L'idée que l'Humanité s'interdise précisément de coloniser ce type de planète favorable paraît totalement absurde !

Pour qu'une civilisation galactique se fixe un tel interdit, il faudrait qu'elle ait une excellente raison de le faire ! On pourrait imaginer une « morale » galactique commune à tous les extraterrestres, consistant à privilégier la plus grande diversité des espèces intelligentes dans l'Univers, et protégeant ainsi les planètes capables de créer de la vie intelligente.

Quelle pourrait être l'origine d'une telle morale ? Sur Terre, des lois tentent aussi de protéger la biodiversité : la raison profonde est que la biodiversité permet à la vie de s'adapter en cas de modification brutale de l'environnement. Par exemple, si on ne garde qu'une certaine variété de maïs en supprimant toutes les autres, la survie du maïs à long terme est compromise : en effet, ce maïs bien particulier, qui nous paraît le meilleur aujourd'hui, pourrait ne pas supporter un changement inattendu dans l'environnement, comme une augmentation brutale de l'acidité des sols. Avec une grande biodiversité, il se trouve toujours une espèce capable de mieux résister que les autres à tel ou tel bouleversement.

Ainsi, la nécessité de protéger la biodiversité sur Terre n'est pas

qu'une morale « éthérée », c'est une nécessité garantissant le maintien de la vie à long terme. Qu'une comète heurte un jour la Terre comme cela a été le cas il y a 65 millions d'années : faute de biodiversité suffisante, la vie risquerait d'être incapable de s'adapter à la modification brutale de l'environnement, jusqu'à une extinction quasi-totale des organismes macroscopiques.

Serait-ce une « morale raisonnée » similaire qui retiendrait les extraterrestres dans la colonisation des environnements les plus favorables ? On pourrait imaginer qu'ils favorisent une telle biodiversité à l'échelle galactique, de sorte d'y maintenir une vie intelligente sur le très long terme.

Mais à cette échelle, les risques sont tout de même beaucoup plus réduits : si on peut tout à fait envisager un cataclysme qui concernerait une planète entière, on voit mal quel cataclysme pourrait mettre à mal la vie dans toute une galaxie... L'intérêt de la biodiversité paraît alors beaucoup moins évident.

De plus, l'Humanité peine aujourd'hui à maintenir la biodiversité alors que cela ne lui coûte pas grand-chose : renoncerait-elle à coloniser un continent entier au nom de la biodiversité s'il en restait un, inhabité ? Certainement pas ! De même, le fait de renoncer à coloniser une planète « idéale » est une contrainte énorme pour une civilisation planétaire, et il paraîtrait étonnant qu'aucune civilisation n'ait cédé à la tentation depuis les origines de l'Univers...

Les OVNIS

Si les extraterrestres existent mais refusent de coloniser la Terre pour y préserver une vie intelligente autochtone, on pourrait imaginer qu'ils observent « en cachette » notre évolution, comme un scientifique étudierait discrètement une communauté animale dans son milieu naturel. Cela donnerait un sens à une hypothétique origine extraterrestre de certains « OVNIS ».

La détection massive d'objets volants non identifiés a débuté pendant la

seconde guerre mondiale et a connu une phase intense pendant trois décennies, perdurant encore aujourd'hui. Si la majorité des cas d'OVNIS finit par trouver une explication, une fraction non négligeable reste inexpliquée et soulève des questions bien réelles, tels que des phénomènes mettant en jeu un grand nombre de témoins crédibles associés à des contacts radar concordants.

Parmi les cas « historiques », citons la « bataille de Los Angeles » en 1942 qui marqua le début de « l'ère » des OVNIS, ou encore l'année 1947 qui initia le mythe de la « soucoupe volante ». « L'incident de Téhéran » de 1976 constitue quant à lui l'un des cas non élucidés les plus marquants.

Si l'origine extraterrestre de certains de ces phénomènes ne peut pas être écartée, il faut tout de même noter que la détection des OVNIS s'est fortement accrue précisément à une époque où l'Homme a « démocratisé » la conquête de l'air. L'hypothèse d'une origine humaine s'en trouve sensiblement renforcée. Par ailleurs, nous avons vu que l'hypothèse d'une « Terre laboratoire » paraît assez peu crédible.

Cela dit, au vu des incertitudes concernant la présence d'éventuelles civilisations extraterrestres dans la galaxie, il faut bien avoir conscience qu'une hypothétique origine extraterrestre de certains OVNIS n'a rien d'absurde ni d'extravagant...

Des formes de vie incompatibles ?

Il faut donc chercher une autre explication. Dans ce qui précède, nous avons supposé que la Terre serait attrayante pour une vie intelligente : cette hypothèse paraît raisonnable, dans le sens où la vie intelligente a besoin d'environnements bien particuliers pour émerger, environnements que la Terre peut proposer. Notamment, une vie intelligente doit être basée sur l'exploitation de sources d'énergie stables, parmi lesquelles le rayonnement solaire et le dioxygène semblent particulièrement efficaces.

Toutefois, même sur une planète très similaire à la Terre, l'évolution de la vie peut fort bien être divergente, tout en menant à l'intelligence. Des formes de vie nées sur deux planètes différentes pourraient alors ne pas être compatibles, en tant que « sources mutuelles de nourriture ».

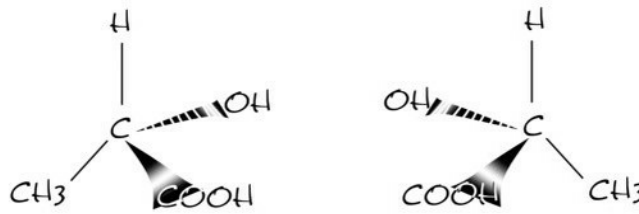
Par exemple, la vie sur Terre est basée sur des molécules ayant toutes une géométrie bien particulière, appelée « gauche ». On peut imaginer une vie sur une autre planète ayant formé des organismes exactement identiques, mais basés sur des molécules « droites », dont la géométrie est symétrique par rapport aux molécules gauches. Cela conduirait à des cellules et à des organismes a priori aussi stables que ceux terrestres.

Or sur Terre, certaines molécules droites sont nocives alors que les mêmes molécules dans leur configuration gauche sont à la base de la nourriture de tous les organismes. Ainsi, un poulet extraterrestre constitué de molécules droites pourrait bien être mortel à très petite dose !

C'est encore plus vrai si les organismes extraterrestres étaient formés de macromolécules différentes de celles terrestres, ce qui semble être une hypothèse plausible : il nous serait alors impossible de manger tout animal ou végétal extraterrestre, faute de pouvoir l'assimiler dans notre propre organisme. Cela signifierait que les différentes formes de vie extraterrestre pourraient se côtoyer, mais formeraient chacune un monde à part sans échange de nourriture possible.

La vie et la rupture de symétrie

Certaines molécules d'apparence très semblables sont pourtant bien distinctes : par exemple ci-dessous, la molécule de gauche n'est pas identique à celle de droite, malgré les similarités apparentes. En effet, si on fait pivoter la molécule de gauche sur elle-même, on ne retrouve pas la molécule de droite car les groupements OH et COOH se retrouvent inversés. On dit que l'une de ces molécules est « droite » et l'autre « gauche »^[1].



Du fait de leur similarité, les molécules droites et gauches devraient être aussi abondantes dans l'Univers. Pourtant, les organismes vivants sont presque toujours constitués de molécules gauches, tandis que les molécules droites sont parfois dangereuses pour la vie. L'origine de cette « rupture de symétrie » et du choix préférentiel des formes gauches reste encore mal comprise aujourd'hui.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas exclu qu'une forme de vie extraterrestre puisse être basée uniquement sur des molécules droites, et non plus gauches : de tels organismes seraient très similaires à ceux terrestres en apparence, mais seraient « incompatibles » avec les terriens gauches.

L'hypothèse la plus plausible reste toutefois que les formes gauches sont plus stables de façon intrinsèque, où qu'on se trouve dans l'Univers : la simple présence d'un champ magnétique pourrait en effet privilégier naturellement les formes gauches. De fait, les observations tendent à indiquer que les acides aminés créés ailleurs que sur Terre sont aussi majoritairement gauches. Le développement de la vie sur Terre aurait alors simplement renforcé la préférence pour cette forme gauche : cela signifierait que tous les extraterrestres sont gauches, comme les terriens.

Ainsi, une civilisation extraterrestre arrivant sur la Terre verrait certes un environnement inerte favorable : océans d'eau liquide, dioxygène dans l'atmosphère. Mais la faune et la flore lui apparaîtraient comme hostiles ou en tout cas totalement inutiles. Il lui faudrait donc amener ses propres animaux et végétaux et attendre qu'ils prospèrent avant de pouvoir « vivre normalement » sur sa nouvelle planète.

Or la faune et la flore autochtones pourraient fortement gêner le développement de ce nouvel écosystème extraterrestre. Le déboisement systématique serait largement insuffisant : le sol

organique lui-même, qui nous paraît si fertile, pourrait être un poison pour les végétaux extraterrestres. Il faudrait donc retirer cette « couche de vie autochtone » pour lui substituer celle extraterrestre.

En d'autres termes, la vie préexistant sur une planète pourrait être une gêne et non un atout pour une colonisation : une planète dénuée de vie serait dans ce cas plus attirante. La Terre ne serait donc pas attractive pour la civilisation galactique, ce qui expliquerait qu'elle ait été délaissée.

Hélas, il reste une faille importante dans ce raisonnement : selon nos connaissances actuelles, une planète dénuée de vie ne peut pas posséder de dioxygène dans son atmosphère. En effet, la photosynthèse est un processus complexe de réactions chimiques, qui requiert des organismes complexes. La complexité est d'ailleurs telle qu'on est incapable encore aujourd'hui de créer chimiquement une « photosynthèse artificielle ».

Ainsi, une civilisation extraterrestre venant « conquérir » une planète sans vie aurait besoin de créer intégralement le dioxygène de l'atmosphère. Or à supposer que l'environnement de la planète le permette (présence de dioxyde de carbone, bon ensoleillement), la modification radicale d'une atmosphère par l'ajout de dioxygène (on parle de « terraformation ») prendrait énormément de temps. En effet, ce dioxygène ne doit pas seulement s'accumuler en masse dans l'atmosphère : il doit préalablement oxyder les roches et se dissoudre dans les océans, ce qui nécessite une quantité considérable. Ainsi, il a fallu plus de 3 milliards d'années sur Terre pour que le dioxygène produit par la vie atteigne son taux actuel dans l'atmosphère.

Du coup, une planète abritant de la vie redevient attractive, car déjà oxydée et pourvue de dioxygène dans l'atmosphère : le besoin d'éradiquer la vie locale apparaît comme un inconvénient mineur rapporté à l'idée de transformer radicalement l'atmosphère

de la planète...

Des extraterrestres à l'époque des dinosaures ?

L'absence d'extraterrestres sur Terre par le passé est assurément l'argument le plus fort contre l'hypothèse de l'existence de civilisations évoluées dans la galaxie. À supposer que les extraterrestres ne souhaitent pas interférer avec une intelligence autochtone, ils auraient pu débarquer sur Terre il y a plus de 2,5 millions d'années, quand l'Homme n'existait pas encore. Et à supposer que la flore et la faune autochtone soient une gêne pour eux, ils auraient pu débarquer au Cambrien, il y a 500 millions d'années, quand le dioxygène était abondant mais les terres encore vierges...

Est-il possible que les extraterrestres se soient installés pendant un certain temps, puis aient « plié bagage » ? À moins d'imaginer qu'ils aient scrupuleusement détruit toute trace, on aurait retrouvé des vestiges d'organismes extraterrestres bien identifiables, de même qu'on retrouve des os de dinosaures aujourd'hui.

Finalement, malgré les nombreux changements dans l'environnement qui se sont produits dans le passé, la Terre ne semble pas avoir attiré qui que ce soit de l'extérieur, comme si c'était une planète sans intérêt... ou comme si les extraterrestres n'existaient pas !

Nous allons tous mourir !

Au vu de la faiblesse des hypothèses avancées jusqu'à présent, nous sommes amenés à envisager un scénario beaucoup plus sombre... Continuons à supposer que la vie intelligente peut émerger facilement au sein de la galaxie : si les extraterrestres n'ont jamais réussi à atteindre la Terre, peut-être serait-ce qu'ils s'autodétruisent systématiquement avant d'y arriver ? Cela signifierait que l'Humanité vit ses dernières heures...

De fait, le développement d'une civilisation technologique subit toujours une phase critique, que l'Humanité est en train de traverser aujourd'hui : comme nous l'avons vu, la construction

d'un vaisseau spatial interstellaire semble mettre en jeu des moyens gigantesques à l'échelle d'un système planétaire. Une civilisation doit donc avoir acquis une dimension planétaire avant d'envisager un tel projet. Cela signifie qu'elle doit avoir le pouvoir de détruire sa propre planète bien avant d'espérer s'installer autour d'une autre étoile !

L'Humanité a franchi cette limite mortelle dans les années cinquante, avec la multiplication des armes atomiques : depuis une soixantaine d'années, la civilisation terrestre a les moyens de s'autodétruire. Or la capacité de colonisation d'un autre système planétaire paraît très lointaine, étant donné l'ampleur d'un tel projet : plusieurs centaines d'années au moins seront nécessaires. Si l'Humanité a « tenu » pendant 60 ans, saura-t-elle de même tenir pendant une durée dix fois plus longue, malgré le développement d'armes de plus en plus destructrices ? L'échec apparent d'hypothétiques civilisations extraterrestres tend à indiquer que non : l'auto-anéantissement de l'Humanité serait alors inéluctable...

Heureusement, ce sombre scénario possède lui aussi ses points faibles. En effet, si la colonisation d'autres systèmes planétaires semble encore lointaine, l'installation de bases permanentes et autonomes sur la Lune ou sur Mars semble beaucoup plus à la portée des Terriens aujourd'hui. Il suffirait que la population de colons sur Mars dépasse un certain seuil pour que l'avenir de l'Humanité soit sauvegardé. Certes il faudra encore du temps avant de voir émerger des colonies martiennes nombreuses et autonomes ; mais cela reste bien plus accessible que le voyage interstellaire.

L'Humanité a déjà tenu 60 ans, et elle a montré qu'elle était capable de gérer ses capacités d'autodestruction : il suffirait qu'elle « tienne » encore pendant peut-être deux cents ans, jusqu'à ce que la colonisation de Mars soit bien engagée. On peut toujours

imaginer que l'Humanité s'autodétruit avant cette date ; mais étant donné le « bon exemple » qu'elle a montré jusqu'à maintenant, il paraîtrait surprenant que toutes les civilisations extraterrestres aient échoué dans cette voie...

Un deuxième argument vient s'ajouter : supposons que l'Humanité s'engage dans un conflit nucléaire qui provoque un obscurcissement de l'atmosphère à cause des poussières soulevées. On retrouverait alors une situation similaire à celle qui a suivi l'impact de la météorite il y a 65 millions d'années, ayant éradiqué les dinosaures. Étant donné l'intelligence de l'Homme par rapport à celle d'un dinosaure, il paraîtrait surprenant que les survivants de la guerre ne trouvent aucun moyen de subsister : en effet, il est peu probable que la faune et la flore soient totalement éradiquées de la planète, comme le montrent les cataclysmes survenus dans le passé. Par ailleurs, les résidus radioactifs ne seraient pas mortels sur toute la surface du globe, seulement de façon localisée.

Tout au plus l'Homme pourrait subir un recul dans son évolution technologique, mais ce recul serait rattrapé en une « fraction de seconde » à l'échelle de la vie d'une planète. Et à supposer que l'espèce humaine échoue à survivre, elle finirait sans doute par réémerger en quelques dizaines de millions d'années, par le biais de la sélection naturelle.

Finalement, pour expliquer que les extraterrestres n'aient jamais pu atteindre le stade de la colonisation planétaire, il faudrait non seulement qu'ils se soient tous autodétruits dans les dix mille galaxies de notre superamas, mais il faudrait en plus qu'un tel scénario se soit répété successivement à l'identique un grand nombre de fois sur chaque planète.

Un tel scénario « d'éradication systématique » semble donc pour le moins extravagant : à vrai dire, il s'agit d'un constat plutôt rassurant...

Mars, premier corps à coloniser ?

La colonisation d'un autre corps que la Terre devrait être l'objectif central de l'Humanité, de manière à assurer la sauvegarde de l'espèce d'une part, et les connaissances de la Civilisation d'autre part.

Quel serait le corps idéal où implanter les premières colonies ? Pour que ces colonies soient autonomes et puissent se développer sans l'aide de la Terre, il faudrait qu'elles disposent d'un minimum de ressources sur place. Parmi elles, l'eau est sans doute la plus précieuse : on peut toujours imaginer que les colonies fabriquent leur eau sur place, encore faut-il que les atomes d'oxygène et d'hydrogène y soient abondants. Or l'hydrogène est le premier à s'enfuir des atmosphères planétaires car c'est un atome très léger : il est donc quasi absent de corps tels que Mercure, Vénus ou la Lune. Certes, de la glace d'eau a été détectée au fond de certains cratères lunaires perpétuellement protégés du Soleil, mais cette eau est en quantité infime.

Sur Mars aussi, la majeure partie de l'hydrogène (donc de l'eau) a été évacuée dans l'espace dès le début de son histoire. Mais il en reste une quantité suffisante dans le sol pour que l'implantation de colonies humaines autonomes y soit envisageable.

Quant aux satellites des planètes géantes, ils sont certes très riches en eau pour la plupart, mais les rayonnements solaires y sont bien trop faibles pour donner l'énergie nécessaire à une implantation humaine. De plus, la glace d'eau tend à y surnager au-dessus du noyau rocheux situé beaucoup plus en profondeur : l'Homme trouverait toute l'eau qu'il lui faut en surface, mais il ne pourrait pas obtenir les matériaux nécessaires à son développement (silicates et minerais divers).

Finalement, si la Lune est la destination logique pour les premières bases habitées, Mars est le seul corps du Système Solaire autorisant un développement humain autonome et de grande ampleur...

L'échec de SETI : une preuve de notre solitude ?

Finalement, certains des arguments cités pourraient éventuellement jouer un rôle dans l'explication du paradoxe de Fermi. Mais aucun ne semble suffisamment plausible pour dominer une autre hypothèse, qui a le mérite de tout simplifier :

nous sommes et avons toujours été seuls, dans la Voie Lactée et parmi toutes les autres galaxies situées jusqu'à quelques centaines de millions d'années lumière...

Cette impression de solitude est renforcée par les échecs systématiques qui ont eu lieu ces dernières décennies dans les tentatives de détection d'une présence intelligente extraterrestre. Le programme SETI illustre ces tentatives : il s'agit de capter d'éventuelles ondes électromagnétiques « artificielles » en provenance d'autres étoiles. Il est en effet facile de distinguer des ondes électromagnétiques naturelles, aléatoires, des ondes « codées » qui pourraient être utilisées par une autre civilisation pour transmettre des informations.

Nous sommes capables de capter des ondes artificielles qui ne seraient pas forcément envoyées intentionnellement vers la Terre : par exemple, les ondes radio utilisées sur Terre seraient détectables depuis une autre étoile proche, bien que ces ondes ne soient pas envoyées intentionnellement vers l'espace. Ainsi, en supposant que d'éventuelles civilisations extraterrestres existent dans la galaxie mais évitent le contact avec la Terre, le programme SETI était censé pouvoir les détecter grâce aux ondes qu'elles émettent sans le vouloir, dans toutes les directions.

Après l'échec des premières observations, le programme SETI s'est poursuivi avec l'initiative « SETI@home », qui utilise les capacités informatiques des particuliers, afin de traiter toutes les données en provenance des étoiles de la galaxie.

À l'heure actuelle, les résultats de SETI sont éloquents : l'entourage du Système Solaire semble résolument désert. Cela semble signifier qu'aucune civilisation n'a colonisé les systèmes planétaires proches, situés à moins de 240 années-lumière de distance.

Ce constat a l'immense mérite d'être en parfait accord avec un autre : aucune civilisation extraterrestre ne s'est jamais installée

sur Terre... SETI tend à indiquer que c'est le lot de l'ensemble des étoiles situées dans notre coin de galaxie : ainsi, la Terre n'a peut-être pas été délaissée parce qu'elle était hostile, ou bien « réserve protégée », mais bien parce qu'aucune civilisation n'a jamais atteint notre coin de galaxie...

L'échec de SETI doit toutefois être largement nuancé. Tout d'abord, les ondes électromagnétiques se subdivisent en des sous-catégories extrêmement variées : elles incluent aussi bien les ondes radio, les infrarouges, la lumière, les ultraviolets ou les rayons X, par exemple... Au sein même des ondes radio, la gamme de « longueurs d'onde » possible est quasi infinie : cela peut aller de quelques millimètres (pour les « hyperfréquences ») à des milliers de kilomètres (à l'instar des ondes circulant dans nos fils électriques). En l'occurrence, SETI s'est surtout concentré sur les longueurs d'onde de l'ordre de la dizaine de centimètres, un cas très particulier.

Bien sûr, ce choix n'a pas été le fruit du hasard : il se trouve que l'espace interstellaire est très transparent à ces longueurs d'onde, ce qui permet de regarder très loin au sein de la galaxie. De plus, si des extraterrestres communiquaient entre eux d'une étoile à l'autre, ils utiliseraient sans doute ces longueurs d'onde puisqu'elles traversent l'Espace sans s'atténuer. C'est donc dans ce domaine que nous avons le plus de chances de détecter des ondes artificielles.

Cependant, rien ne garantit que de telles longueurs d'onde soient utilisées dans les communications au sein d'une même planète. Quant aux communications interstellaires, elles pourraient être très focalisées et ne pas se disperser dans tout l'Espace : il y aurait alors peu de chance pour que la Terre se trouve sur leur trajet.

Enfin, il n'est pas certain qu'une civilisation avancée rayonnerait aussi « bruyamment » dans l'Espace que ne le fait l'Humanité aujourd'hui : par exemple, les fibres optiques permettent de

transporter l'information de façon beaucoup plus discrète que les bonnes vieilles ondes radio qui rayonnent dans toutes les directions...

On pourrait aussi se dire qu'une civilisation avancée aurait inventé un autre moyen de transporter l'information. Mais les ondes électromagnétiques ne sont pas une simple technologie anecdotique, que l'Humanité finira par abandonner dans le futur. Elles sont aussi fondamentales dans la Nature que la matière elle-même : elles baignent tout l'Univers, et la lumière visible issue des étoiles n'en est qu'un cas particulier, qui illustre leur importance.

Ainsi, l'idée que les ondes électromagnétiques artificielles puissent caractériser une civilisation technologique extraterrestre n'est pas un simple reflet subjectif des connaissances de notre époque : il s'agit sans doute de la technologie la plus universelle possédée par toute civilisation, quel que soit son stade d'avancement. En revanche, l'idée qu'une civilisation rayonnerait ces ondes partout dans l'Espace, et ce précisément dans une certaine gamme de longueurs d'onde très étroite, est une vision des choses très liée à notre époque. Il est tout à fait envisageable que dans cent ans, la Terre ne rayonne plus autant d'ondes radio, même si elle continue à les utiliser de façon plus discrète et ciblée. Cela expliquerait le « vide » total observé par le programme SETI.

Finalement, SETI ne propose aucune réponse claire à la présence ou à l'absence de civilisations extraterrestres dans notre proche environnement. Il s'agit juste d'un argument supplémentaire qui vient s'ajouter au paradoxe de Fermi, et qui nous invite à envisager sérieusement notre immense solitude au sein de la galaxie...

SETI : un programme, 70 projets...

SETI est un programme de recherche d'intelligence extraterrestre né dans les années soixante, au sein duquel se sont inscrits un grand nombre de

projets internationaux. Les méthodes de détection sont multiples, mais la plupart utilisent des radiotélescopes captant les ondes radio : en particulier, le célèbre radiotélescope d'Arecibo situé à Porto Rico fournit les données dans le cadre du programme SETI@home.

Parmi les projets les plus récents, le projet Phoenix démarré en 1995 s'est concentré sur les 800 étoiles de type solaire les plus proches, situées à moins de 240 années-lumière, dans une gamme de fréquences radio bien particulière. Les résultats sont tout à fait négatifs : les capacités de détection mises en place n'ont pu mettre en évidence qu'un parfait « silence radio » dans notre proche environnement.

Un développement hors de portée de l'imagination

SETI a aussi le mérite d'illustrer la « myopie » de l'Homme, dans le sens où ce programme consiste à détecter des civilisations qui auraient un développement technologique comparable au nôtre, les amenant à rayonner certaines ondes radio bien précises en direction de la Terre. Or au vu des centaines de millions d'années à disposition des vies intelligentes extraterrestres, il paraît utopique d'imaginer une civilisation technologiquement semblable à la nôtre, ne serait-ce qu'à 1 000 ans près...

Ce constat illustre un point essentiel : nous ne pouvons appréhender le monde qu'à travers nos connaissances et nos technologies actuelles. Or dans le cas des civilisations extraterrestres, un immense problème d'échelle temporelle se pose. Les auteurs de science-fiction particulièrement visionnaires peuvent toujours imaginer à quoi ressembleront les technologies dans cent ans ou dans mille ans. Mais comment serait-il possible d'imaginer notre propre civilisation dans un million d'années ? Au vu des bouleversements des deux derniers siècles, comment pourrions-nous anticiper les évolutions sur une durée dix mille fois plus longue ?

C'est pourtant la question posée lorsqu'on s'intéresse à une

civilisation extraterrestre. Les civilisations humaines n'existent que depuis 7 000 ans environ, alors que certaines civilisations extraterrestres pourraient exister depuis des centaines de millions d'années... Autrement dit, les chances de détecter une civilisation d'un avancement comparable au nôtre ou inférieur sont quasi nulles. Certaines sont peut-être âgées de 500 millions d'années, d'autres de 50 millions d'années, d'autres de « seulement » 5 millions d'années... Même si tous les âges étaient équitablement représentés, cela ne laisserait que des civilisations dont le développement est sans comparaison avec celui de la Terre. Même une civilisation « toute récente » de 1 million d'années d'âge est hors de portée de l'imagination des plus visionnaires d'entre nous !

Ce problème majeur d'échelle temporelle est crucial dès qu'on souhaite imaginer à quoi peuvent ressembler la galaxie aujourd'hui et son « peuplement extraterrestre ». En fait, il laisse toutes les hypothèses ouvertes. Prenons quelques exemples en essayant de nous imaginer les voies de développement futur possibles.

Tout d'abord, il est plausible que l'Homme domestique de plus en plus son propre corps, jusqu'à le rendre entièrement recyclable et résistant à toute maladie (n'oublions pas que nous essayons d'imaginer le futur dans un million d'années, et non pas dans cent ans...). Autrement dit, l'idée de pouvoir vaincre un jour le vieillissement paraît tout à fait raisonnable. Le corps pourrait même devenir intégralement artificiel, tout en restant probablement organique : nous avons vu en effet que les molécules organiques complexes restaient sans doute les meilleures candidates pour la création de cette structure infiniment complexe et ordonnée qu'est le corps humain.

Une civilisation capable de réparer intégralement un corps serait

capable d'en fabriquer un. Serait-elle capable de fabriquer de même un « esprit », donc de créer « artificiellement » des êtres conscients ? Cela dépend de l'origine de la conscience. La conscience trouvant un support dans le cerveau, il paraît raisonnable de penser qu'il existe une structure matérielle bien particulière à ce niveau permettant le développement de la conscience.

La reproduction matérielle d'un cerveau, alimenté comme celui d'un être vivant, permettrait-il d'y faire jaillir la conscience ? C'est possible, mais il y a ici un fossé insondable dans le passage de l'objectif (le « matériel ») au subjectif (le « spirituel »). Notons simplement que de tels êtres artificiels se comporteraient en tous points comme des êtres humains « naturels », et qu'il serait impossible de déterminer si l'un est conscient et pas l'autre, dans la vie de tous les jours. Notons aussi que l'être artificiel serait créé à partir de molécules organiques complexes, exactement à l'instar d'un « bébé-épiprouvette » « naturel » comme il en existe aujourd'hui : on voit mal ce qui expliquerait l'apparition de la conscience chez l'un et pas chez l'autre...

Avant même de pouvoir créer artificiellement un être de A à Z, il sera possible de modeler cet être presque à l'infini par le biais de la génétique. Finalement, l'évolution que pourraient prendre les formes de vie à l'échelle du million d'années en devient impénétrable, sans comparaison avec l'évolution « lente » des espèces qui s'est produite sur Terre jusqu'à maintenant.

En particulier, une telle civilisation pourrait s'affranchir des causes de plaisir et de souffrance « traditionnelles » et « primitives », qui sont aujourd'hui génétiquement enracinées en nous. Ainsi, un parfait contrôle de la matière permettrait un parfait contrôle de l'esprit : il est bien difficile d'imaginer dans quelle direction évolueraient les sentiments et les émotions des individus au sein d'une telle civilisation. On peut imaginer des êtres devenus

immortels, spirituellement en paix totale avec eux-mêmes et avec les autres, dans un état de bonheur permanent.

Que deviennent alors les besoins de colonisation ? De tels extraterrestres, devenus méconnaissables physiquement et psychiquement, chercheraient-ils à créer de nouveaux êtres conscients (ce qu'on appelle la « reproduction » aujourd'hui), et à accroître leur population ? Rien n'est moins sûr : n'oublions pas que le besoin de reproduction est sans doute le besoin « primitif » le plus évident hérité de la sélection naturelle, et n'a donc aucune raison de perdurer chez de tels êtres.

Finalement, revenons à l'époque actuelle : l'Humanité cherchera sans doute à coloniser les planètes proches les plus favorables, dès qu'elle saura le faire. Dans dix mille ans, elle se sera peut-être étendue jusqu'à quelques milliers d'années-lumière autour de la Terre. À cette époque, elle aura tellement évolué matériellement et spirituellement que ses besoins seront sans doute complètement différents de ceux imposés par la « sélection naturelle ». Il est alors possible que « l'expansion coloniale » cesse d'elle-même. En effet, si les Hommes acquièrent la « plénitude », par exemple grâce à une modification matérielle de leur propre corps et de leur patrimoine génétique, la notion de « désir » disparaîtra automatiquement. Sans désir, les besoins de reproduction et de colonisation n'ont plus lieu d'être.

Notons qu'à ce moment-là, l'Humanité n'occupera qu'un petit bout de galaxie de quelques milliers d'années-lumière de diamètre centré sur la Terre : il est alors possible qu'elle n'ait rencontré aucune civilisation extraterrestre, l'environnement local étant plutôt pauvre en étoiles par rapport au cœur galactique.

Peut-être que chaque civilisation extraterrestre commence ainsi à construire sa propre « bulle d'expansion », qui s'arrête naturellement au bout de quelques milliers d'années-lumière : ces

bulles pourraient s'interpénétrer près du cœur galactique riche en étoiles, créant des contacts entre les civilisations. En revanche, aucune bulle n'aurait atteint la Terre jusqu'à présent en raison de la faible densité d'étoiles, fournissant l'explication du paradoxe de Fermi.

Avec cette vision des choses, on est très loin d'une civilisation galactique commerçant ou guerroyant entre les étoiles au moyen d'innombrables vaisseaux spatiaux...

À vrai dire, le point de vue proposé reste sans doute lui aussi très loin de la réalité. Il a toutefois le mérite de mettre en avant un aspect essentiel : étant donné les échelles de temps en jeu dans la colonisation d'une galaxie, il est impossible de savoir comment pourrait évoluer la civilisation, matériellement et spirituellement. Or, notre vision des choses est d'une subjectivité affligeante, systématiquement centrée sur notre propre développement spirituel et matériel, que nous extrapolons sans vergogne à l'infini dans l'espace et dans le temps. C'est peut-être dans ce biais fondamental que réside l'origine du paradoxe de Fermi...

Notes

[\[1\]](#) On parlait autrefois de molécules « dextrogyres » et « lévogyres ». La dénomination officielle distingue aujourd'hui les molécules de type « R » (Rectus) et « S » (Sinister), c'est-à-dire « droite » et « gauche ».

Scénarios du futur

« L'Univers n'est qu'un vaste océan, sur la surface duquel nous percevons quelques îles plus ou moins grandes, dont la liaison avec le continent nous est cachée. »

D'Alembert, discours préliminaire à l'Encyclopédie, 1751

Nous entrons ici dans la fiction en proposant plusieurs avenir possibles pour l'Humanité, au vu des connaissances actuelles résumées dans les précédents chapitres. Nous commencerons par un scénario plutôt optimiste, avant de continuer sur un autre où il nous faudra faire face à notre solitude...

Scénario 1 : Bienvenue parmi nous !

Un environnement proche plein de promesses

2030 : Lancement d'un interféromètre spatial constitué d'un réseau de télescopes en orbite : le but est de pouvoir étudier en partie la composition des atmosphères des exoplanètes. Deux ans plus tard, de l'ozone est détecté sur une planète orbitant à 30 années-lumière de distance, un indice fort de présence de dioxygène. Un grand nombre d'autres découvertes suivront : la planète oxygénée la plus proche se trouve à 20 années-lumière de distance.

L'atmosphère des planètes à portée de télescope ?

L'ingéniosité que l'Homme doit déployer pour détecter des exoplanètes est tout simplement prodigieuse : détecter un équivalent de la Terre situé à 10 années-lumière de distance revient à distinguer un ver luisant placé à un mètre d'un phare depuis une distance de sept cents kilomètres... Ainsi, les exoplanètes ne peuvent pas être observées directement aujourd'hui : elles sont détectées grâce aux perturbations gravitationnelles infimes qu'elles exercent sur leur étoile au cours de leur orbite.

Dans ce cas, comment serait-il possible d'analyser la composition de leur atmosphère, puisque c'est le mouvement de l'étoile qu'on observe, et non celui des planètes ? L'interférométrie offre de belles perspectives à ce niveau : elle utilise le fait que la lumière se propage en oscillant, comme des vagues à la surface de l'eau. Si on capte ces vagues en deux endroits différents, par le biais de deux télescopes, alors les deux systèmes de vagues obtenus vont pouvoir « interférer » (de même, si on lance deux cailloux dans l'eau, les cercles dus à chacun d'entre eux finissent par interférer en se juxtaposant).

Si une planète orbite autour de l'étoile, alors elle envoie elle aussi sa propre lumière, qui va créer ses propres interférences par le biais de nos deux télescopes. Celles-ci sont décalées par rapport à celles de l'étoile, ce qui permet de distinguer la contribution des deux astres dans le signal résultant : une fois la lumière de la planète isolée de celle de l'étoile, il devient possible de l'analyser.

Les rayonnements émis par la planète dépendent en partie de la composition de son atmosphère : la détection du signal de la planète doit donc permettre de déduire la présence de certains constituants chimiques (notamment l'ozone). Il faudra pour cela utiliser un réseau de télescopes spatiaux suffisamment distants les uns des autres pour pouvoir exploiter les interférences obtenues.

2040 : Mise en service d'un radiotélescope puissant chargé de détecter des signaux radio en provenance de ces planètes, sur une très large gamme de fréquences. De discrètes émissions non naturelles sont captées en provenance de certaines d'entre elles. Cela relance les projets de vaisseau interstellaire inhabité, mais les technologies restent largement insuffisantes à cette époque.

2070 : La maîtrise de moteurs spatiaux de plus en plus performants autorise la mise en développement du premier vaisseau interstellaire inhabité, au niveau international. À cette époque, les bases lunaires se développent.

2100 : Départ du vaisseau à destination de la planète la plus proche rayonnant des signaux artificiels. Le carburant constitue la plus grande partie de la masse du vaisseau, qui s'élève à plusieurs dizaines de milliers de tonnes. Il emporte toute une batterie d'instruments scientifiques. Le voyage doit durer cent trente ans. Aucune phase de décélération n'est prévue à l'arrivée, car la masse de carburant à emporter serait trop importante : le vaisseau ne peut procéder qu'à un simple survol de la planète. Il doit envoyer plusieurs sondes plus petites au cours de ce passage pour pouvoir approcher différentes cibles.

Pendant ce temps, les premières bases humaines se développent sur Mars en quasi-autonomie.

2110 : Un deuxième vaisseau spatial est envoyé, sur le modèle du premier, sur une autre planète supposée posséder une civilisation technologique. Cela permet d'atténuer l'éventuel désastre que constituerait la perte du premier vaisseau.

2120 : Un vaisseau de deuxième génération développé pendant les dernières décennies est envoyé à destination d'Alpha du Centaure, située à 4,3 années-lumière de distance. Le voyage doit durer une quinzaine d'années.

2135 : Retour des premières données en provenance d'Alpha du Centaure. Une planète située dans la zone d'habitabilité de l'étoile principale et possédant des lacs d'eau liquide à sa surface est détectée. Elle ne semble abriter aucune forme de vie, et son atmosphère riche en diazote et en dioxyde de carbone est irrespirable.

L'exploration des autres étoiles les plus proches du Soleil se poursuit dans les décennies à venir. Si l'eau liquide y est parfois

présente, aucune vie n'est détectée. Le dioxygène est également absent, ce qui semble exclure toute colonisation de masse.

Les bases humaines sur Mars se multiplient, ce qui amorce une véritable colonisation de la planète, à l'intérieur de gigantesques « bulles d'oxygène ». Grâce au développement des moteurs spatiaux, les ressources minières commencent à être exploitées de façon industrielle, d'abord sur la Lune, puis sur Mars. Un embryon de commerce se forme.

Le projet Dædalus

Dans les années soixante-dix, des études de faisabilité concernant un futur vaisseau interstellaire ont été menées, notamment dans le cadre du projet britannique Dædalus. L'énergie de propulsion était obtenue par la fusion thermonucléaire, et sa vitesse devait atteindre 12 % de celle de la lumière. La masse de carburant devait s'élever à 50 000 tonnes, constituées d'un mélange de deutérium et d'hélium 3.

Un type de vaisseau similaire a été retenu dans le scénario futuriste proposé. Il faut bien sûr noter qu'à ce jour, les capacités technologiques restent toujours largement insuffisantes pour envisager la construction d'un tel vaisseau.

La Révolution Anthropique

2250 : Les signaux en provenance du premier vaisseau spatial interstellaire, envoyé en 2100, parviennent sur Terre. Il s'agit du premier contact avec une race de la civilisation technologique intergalactique.

L'Humanité apprend que l'ensemble du Superamas de la Vierge est habité par un très grand nombre de races, chacune issue d'une planète différente. Ces races ont un niveau de développement très différent les uns des autres. Certaines interagissent entre elles par le biais du commerce interstellaire, au sein de la Voie Lactée mais aussi d'une galaxie à une autre. D'autres tendent au contraire à s'isoler et à quitter ce réseau commercial.

Si le commerce entre les races est prospère, en revanche deux races distinctes ne peuvent pas se côtoyer sur une même planète. En effet, chaque planète a conduit à des organismes basés sur des cellules complexes différentes. En posant le pied sur une planète étrangère, tout être y amène un grand nombre de bactéries susceptibles de s'y multiplier. La propagation peut devenir rapidement non maîtrisable : pour peu que les bactéries introduites soient plus « agressives » ou plus efficaces que les bactéries autochtones, la vie extraterrestre peut prendre le pas sur la vie locale, jusqu'à l'anéantir.

De même, un être posant le pied sur une autre planète possédant la vie et revenant ensuite chez lui peut y ramener un certain nombre de bactéries extraterrestres qui pourraient s'y développer de façon catastrophique.

Cela explique que la Terre ait été délaissée depuis les origines : non seulement les extraterrestres y ont trouvé une vie hostile à leur implantation, mais de plus ils ont intérêt à tenir cette vie à l'écart de leur propre planète pour éviter toute contamination.

Finalement, les contacts entre races ne peuvent se faire que par l'intermédiaire de robots intégralement « nettoyés » à l'arrivée et au départ de chaque planète, ou bien à condition que les extraterrestres possèdent des combinaisons hermétiques, là encore soigneusement « stérilisées ».

L'Humanité ne peut donc pas coloniser une planète abritant la vie. Or, toutes les planètes ayant une atmosphère « oxygénée » possèdent de la vie, car seule la vie peut créer du dioxygène efficacement : cela veut dire que l'Humanité, comme toutes les autres races extraterrestres, doit se contenter de planètes inertes si elle souhaite s'étendre dans la galaxie. Elle doit créer intégralement le dioxygène de l'atmosphère, puis y amener la vie terrestre afin de mettre en place un écosystème accueillant.

Deux méthodes apparaissent possibles pour « terraformer » ainsi

une planète : la première consiste à amener quelques cyanobactéries dans les mers de cette planète, afin qu'elles se multiplient grâce à l'énergie de l'étoile et au dioxyde de carbone de l'atmosphère. La production de dioxygène par ces bactéries, réparties sur toutes les étendues maritimes, devient alors suffisamment intense pour espérer augmenter la concentration de dioxygène dans l'atmosphère. Le problème est que cette méthode « naturelle » est lente : au moins dix mille ans avant de pouvoir envisager une atmosphère respirable...

La deuxième méthode consiste à créer artificiellement le dioxygène, par exemple à partir de l'électrolyse de l'eau. Mais cela requiert des quantités d'énergie énormes, qui nécessitent un usage massif de la fusion nucléaire. De plus, si le but est d'obtenir une atmosphère respirable en seulement cent ans, alors le débit d'eau à transformer en dioxygène est supérieur au débit de l'Amazone... Cela requiert donc des installations extrêmement volumineuses : si on ajoute à cela les temps de trajet jusqu'à la planète à coloniser, et l'énergie à dépenser pour le transport, il apparaît clairement que la colonisation d'une nouvelle planète n'est pas anodine.

La planète doit donc posséder suffisamment de richesses naturelles pour justifier sa colonisation : il s'ensuit que seule une petite fraction des planètes de notre galaxie sont colonisées, y compris parmi les planètes chaudes possédant de l'eau liquide.

Chaque race ne s'étend pas moins sur un grand nombre de planètes au cours de son développement : parmi les planètes possédant du dioxygène aujourd'hui, la plupart sont des colonies terraformées à partir d'une planète mère. C'est le cas en particulier de la planète atteinte par le premier vaisseau interstellaire terrien.

Le plancton, principal producteur de

dioxygène

Sur Terre, la majeure partie du dioxygène que nous respirons est produit par le plancton présent à la surface des océans. L'énergie lumineuse totale captée annuellement par photosynthèse, de la part de l'ensemble de la biosphère, est dix fois plus élevée que la consommation annuelle d'énergie par l'Homme. Cette énergie est convertie sous forme chimique (dioxygène, molécules organiques complexes), et sert à alimenter l'intégralité de la vie sur Terre (en dehors de celle des dorsales océaniques). Autrement dit, l'Homme à lui seul consomme presque 10 % de l'énergie totale utilisée par la vie sur Terre (animaux, végétaux et organismes microscopiques)...

Le plancton a aussi permis de créer la majorité du carbone organique utilisé par la vie, en l'extrayant du dioxyde de carbone atmosphérique : la production totale de carbone organique grâce à la photosynthèse est de cent milliards de tonnes par an. Par ailleurs, chaque atome de carbone ainsi converti s'accompagne en parallèle de la production d'une molécule de dioxygène.

Serait-il envisageable de créer des organismes génétiquement modifiés capables d'exploiter plus efficacement la lumière du soleil pour produire davantage de dioxygène ? Sur Terre, environ un millième de l'énergie solaire incidente est convertie en énergie chimique par la photosynthèse, ce qui est déjà considérable. Pour produire davantage de dioxygène en un temps donné, il paraît difficile de faire beaucoup mieux à partir de l'énergie solaire : la sélection naturelle s'est d'ailleurs déjà chargée d'optimiser l'énergie captée, et il paraît donc difficile d'obtenir mieux par la génétique.

Finalement, le seul moyen de créer beaucoup plus de dioxygène est d'utiliser une source d'énergie plus riche que la lumière solaire : le deutérium exploité par la fusion nucléaire semble être la seule alternative d'avenir. C'est la raison pour laquelle la terraformation d'une planète en un temps « acceptable » doit probablement passer par la mise en place de centrales à fusion massives, associées à d'énormes usines de production de dioxygène...

L'intronisation dans la civilisation intergalactique

Le premier contact avec la civilisation galactique effectué en 2250 permet à l'Humanité d'apprendre une autre donnée essentielle : il est possible de bâtir des « ponts quantiques » permettant de

franchir rapidement des distances considérables, « court-circuitant » la limitation liée à la vitesse de la lumière. Sans cette technologie, les interactions entre les races seraient quasi inexistantes.

En effet, il ne naît au sein de notre galaxie que quelques étoiles par an. Seule une fraction d'entre elles abrite une planète chaude possédant de l'eau liquide. Et parmi ces planètes bien particulières, seule une petite fraction vérifie sans doute tous les critères pour permettre à une vie intelligente d'émerger.

Le fait d'imaginer qu'une étoile sur cent mille puisse développer une civilisation technologique ne paraît donc pas particulièrement pessimiste : cela signifie qu'un million d'étoiles sont capables de faire émerger une civilisation au sein de notre galaxie... En particulier, cela implique que les planètes les plus proches capables de développer une civilisation ne sont qu'à 200 années-lumière de nous, ce qui est très peu au regard des distances galactiques.

Cela implique surtout que malgré cette forte « densité de civilisations », une nouvelle civilisation naît tous les cent mille ans seulement dans notre galaxie. Or l'écart technologique acquis pendant cent mille ans est démentiel : si tant est que les civilisations âgées de cent mille ans existent toujours, elles sont probablement méconnaissables par rapport à une nouvelle civilisation tout juste née, et n'ont sans doute rien à tirer d'un commerce avec elle. La conclusion reste valable même si on envisage une hypothèse encore plus optimiste, avec un nombre de civilisations dix fois plus grand...

Ainsi, l'idée de civilisations technologiquement comparables situées à seulement quelques dizaines à centaines d'années-lumière de distance paraît totalement exclue. Deux civilisations technologiquement proches (disons à mille ans près) ont peu de chance d'habiter la même galaxie (il faudrait qu'une étoile sur

mille puisse développer la vie intelligente) ; et même si c'était le cas (hypothèse très optimiste...), plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière en moyenne les sépareraient l'une de l'autre.

Cela implique qu'un réseau commercial entre civilisations différentes est inenvisageable s'il est impossible de dépasser la vitesse de la lumière. Pour mettre en jeu un grand nombre de civilisations technologiquement comparables, un réseau commercial doit s'étendre sur un grand nombre de galaxies, par exemple à l'échelle du Superamas de la Vierge (contenant dix mille galaxies). Il est évident qu'au vu des distances en jeu (200 millions d'années-lumière !), la limitation de la vitesse de la lumière doit être contournée d'une manière ou d'une autre pour autoriser l'établissement de courants commerciaux.

La physique quantique fournit quelques éléments intéressants pour un auteur de science-fiction. Elle indique que toute particule s'étale dans l'espace sous forme d'onde jusqu'à sa détection où elle redevient ponctuelle. Cela implique qu'un événement concernant un endroit bien précis (la détection) a des conséquences instantanées sur tout l'espace qui était occupé par l'onde (même si elle s'étendait sur plusieurs années-lumière de distance). Par ailleurs deux particules distinctes peuvent parfois former une seule onde (on dit qu'elles sont « intriquées »). La détection de l'une d'entre elles provoque alors une « création d'information » instantanée sur l'autre. Ce « transfert d'information » d'une particule à l'autre se fait à une vitesse infinie, et n'est donc pas limité par la vitesse de la lumière.

Hélas en l'état actuel de nos connaissances, cela ne peut pas servir à transmettre des informations d'une étoile à une autre, car l'opérateur ne peut en aucun cas imposer l'information à transmettre : cette information se crée lors d'une détection de façon aléatoire, sans cause apparente. Pour les besoins du scénario, nous faisons ici l'hypothèse que cet aspect aléatoire n'est

qu'apparent, et soumis à une cause encore inconnue sur laquelle il est possible d'agir. Dans ces conditions, la transmission instantanée d'information devient possible, ouvrant la voie à une téléportation quantique non soumise aux contraintes de la vitesse de la lumière. C'est pourquoi nous avons retenu le terme de « pont quantique » dans ce scénario.

En 2250, l'Humanité n'a pas encore les moyens de mettre en œuvre de tels ponts à grande échelle. À cette époque, elle a étendu son emprise sur tout le Système Solaire : cela rend possible l'exploitation d'une gigantesque quantité d'énergie par le biais de la fusion nucléaire. Une production en masse d'antimatière s'est engagée, réduisant considérablement la taille et le coût des vaisseaux spatiaux.

C'est le contrôle de densités d'énergie toujours plus importantes qui permet d'envisager peu à peu la construction des « ponts quantiques ». Un siècle s'écoule encore avant que ce type de technologie ne devienne envisageable : pendant ce temps, les contacts avec la civilisation intergalactique ne se font qu'à distance, par le biais des ondes électromagnétiques. Les informations données par cette civilisation restent très parcellaires, et ne cherchent pas à accélérer trop fortement les découvertes des Terriens.

La durée de construction du premier pont quantique interstellaire est elle aussi de l'ordre du siècle : elle est notamment pilotée par la distance en années-lumière des deux points à relier. L'achèvement de ce dispositif est sans doute la révolution la plus capitale dans l'Histoire de l'Humanité : à compter de ce jour, elle est définitivement intronisée au sein de la civilisation intergalactique. À l'échelle du Superamas de la Vierge, un tel événement ne se produit que tous les cinquante ans en moyenne...

Les enseignements de la théorie des cordes

C'est dans le domaine des très petites échelles que la physique fondamentale a encore des découvertes à faire. La théorie des cordes est particulièrement prometteuse dans sa description de l'univers microscopique. Elle propose de voir les particules élémentaires non plus comme des points, mais comme des petites cordes vibrantes. Ces cordes peuvent être des « bouts de ficelle » s'étendant dans l'espace « traditionnel » à trois dimensions, mais elles peuvent aussi être des sortes « d'élastiques » qui s'enroulent le long de nombreuses dimensions supplémentaires. Ces dimensions supplémentaires sont repliées sur elles-mêmes à l'échelle microscopique, ce pourquoi il est impossible de les percevoir à notre échelle.

Imaginons un tube cylindrique creux sur lequel marcherait une fourmi : le tube a alors deux dimensions, puisque la fourmi peut soit marcher le long du tube (première dimension), soit en faire le tour (deuxième dimension). Un déplacement est bien évidemment possible dans les deux dimensions à la fois.

Il y a toutefois une différence fondamentale entre ces deux dimensions. La longueur du tube est très grande et s'étend à l'infini : elle représente nos trois dimensions spatiales traditionnelles. Tandis que la circonférence du tube est très petite et repliée sur elle-même : elle représente les dimensions microscopiques supplémentaires de notre univers dans lesquelles s'enroulent les cordes. À notre échelle, le tube est tellement long et fin que son épaisseur est indétectable : une seule dimension est visible (la longueur du tube).

Malgré leur taille très réduite, les dimensions supplémentaires de l'Univers ont bel et bien des conséquences à notre échelle. Par exemple, la force électrostatique se propage uniquement dans les trois dimensions traditionnelles, tandis que la force gravitationnelle se propage peut-être aussi dans les dimensions supplémentaires : cela expliquerait la faible intensité de la force gravitationnelle par rapport à la force électrostatique, qui entraîne des conséquences fondamentales sur la structure de l'Univers et sur notre propre existence...

Notons au passage que les deux forces décroissent comme le carré de la distance, ce qui tend à indiquer qu'il n'existe pas de dimension supplémentaire à l'échelle macroscopique (si c'était le cas, la force gravitationnelle décroîtrait beaucoup plus vite avec la distance, car elle « s'essoufflerait » rapidement en s'étendant dans toutes les dimensions).

Finalement, bien que présentes uniquement à l'échelle microscopique, il n'est pas impossible que ces dimensions supplémentaires puissent trouver des applications à l'échelle macroscopique, par exemple dans le voyage

Description de la civilisation intergalactique

La connexion au réseau commercial intergalactique est une source de profits potentiels énormes, mais c'est aussi une source de dangers considérables : le Système Solaire devient subitement une « proie » facile pour toute race extraterrestre, la Terre n'étant plus protégée par les dizaines d'années-lumière de distance à parcourir. Certes les problèmes de « compatibilité » entre races mettent la Terre à l'abri d'une colonisation extraterrestre, mais certaines races parmi les plus « agressives » peuvent en profiter pour s'imposer au niveau commercial.

À l'échelle du Superamas de la Vierge, le réseau commercial met en liaison des races aux niveaux technologiques très variés. Les besoins comme les capacités de production sont donc très différents. Comme sur Terre, les échanges concernent les matières premières, les biens industriels, mais aussi les services. Les races les moins avancées, récemment entrées dans ce réseau, fournissent plutôt des matières premières et demandent des biens industriels. Les matières premières recherchées sont elles-mêmes très différentes selon le niveau technologique atteint par la civilisation concernée. Cette recherche de matières premières constitue une motivation forte pour la colonisation de nouvelles planètes.

En fait, les besoins en colonisation de la civilisation terrestre sont d'abord pilotés par la volonté d'assurer la sauvegarde de l'espèce : la colonisation de Mars, amorcée depuis longtemps, en est une première garantie. Mais en l'absence d'eau en grande quantité, il paraît difficile de terraformer Mars jusqu'à créer une atmosphère riche en dioxygène. La colonisation d'une planète dotée d'une

grande quantité d'eau liquide doit donc consolider cet acquis.

Deux impératifs pilotent alors le choix de la planète à terraformer : d'une part l'étoile doit être proche du Soleil pour éviter des durées et des coûts de transport trop importants. D'autre part, le dioxygène doit pouvoir s'accumuler facilement dans l'atmosphère. En particulier, cela exclut les planètes trop actives dont le dégazage détruirait le dioxygène formé.

En raison de sa proximité au Soleil, le système d'Alpha du Centaure pourrait être le premier concerné, à condition qu'une planète vérifie ces propriétés. Avec l'aide de machines de terraformation efficaces, l'atmosphère pourrait y devenir respirable en un à plusieurs siècles.

Une fois cette première phase franchie, les besoins poussant à la colonisation deviennent très différents : il s'agit d'accéder à des sources de matières premières plus riches et plus facilement exploitables que celles du Système Solaire. La décision de coloniser un système planétaire est alors pilotée par le rapport entre le coût de l'opération et le gain attendu. La colonisation est une opération lourde, car il faut d'abord connecter ce système par le biais d'un pont quantique. C'est ce qui explique que seule une petite fraction de systèmes planétaires dans notre galaxie soit colonisée.

Depuis les temps immémoriaux où le réseau intergalactique est en place, tous les systèmes suffisamment attrayants ont été colonisés. Les nouvelles colonisations sont donc liées à la naissance de nouveaux systèmes planétaires : si un système planétaire sur cent est « apte à être colonisé », cela laisse une centaine de nouvelles planètes colonisables par an au sein du Superamas de la Vierge.

Est-ce la « foire d'empoigne » entre les races pour acquérir ces nouveaux systèmes planétaires ? Selon leur niveau technologique, toutes les races ne sont pas intéressées par les mêmes planètes.

Par ailleurs, une fois qu'une race a acquis un certain âge et un certain développement, et une fois qu'elle s'est étendue sur un nombre suffisant de planètes, l'intérêt de commercer avec d'autres races devient moins évident : elle est alors amenée à se replier naturellement sur elle-même, quittant le réseau et cessant la colonisation de nouvelles planètes.

Supposons que dix mille ans s'écoulent en moyenne avant d'atteindre ce stade. En imaginant qu'une nouvelle civilisation naisse tous les cinquante ans dans le Superamas de la Vierge, cela laisse deux cents civilisations en compétition au sein du réseau commercial. Ces civilisations ont des niveaux technologiques bien différents : on peut imaginer qu'une dizaine de races parmi elles ont à peu près les mêmes besoins, et se focalisent donc sur les mêmes planètes à coloniser. La compétition dans la « course à la colonisation » apparaît alors raisonnable.

Par ailleurs, puisque deux cents races appartiennent au réseau commercial, et qu'il y a une centaine de nouvelles planètes colonisables par an dans le Superamas de la Vierge, cela laisse une planète disponible pour chaque race tous les deux ans... Pendant ses dix mille ans de développement au sein du réseau commercial, une race est donc susceptible de coloniser plusieurs milliers de planètes...

Cet ensemble considérable de planètes acquises constitue alors une source suffisamment riche, accessible et durable de matières premières de toutes sortes, pour que la race concernée décide de se retirer du réseau commercial et de cesser toute nouvelle colonisation.

Quant à l'augmentation de population d'une race, elle est pilotée par la valeur ajoutée d'une personne supplémentaire : celle-ci doit apporter plus de ressources qu'elle n'en consomme. C'est ce qui limite naturellement l'expansion démographique : la population et le nombre total de planètes colonisées se stabilisent en parallèle,

de sorte que la richesse de chacun atteigne un optimum. La colonisation d'une planète supplémentaire devient trop chère par rapport au gain retiré, tandis que la naissance d'une personne supplémentaire entraînerait une consommation de richesse plus importante que sa production. En termes économiques, le « gain marginal » apporté par une personne ou une planète supplémentaire devient nul : la race a atteint son équilibre naturel.

L'héritage de Malthus

À la charnière des XVIII^e et XIX^e siècles, Malthus s'inquiète de la tendance naturelle de la population à augmenter beaucoup plus vite que les ressources nécessaires pour la nourrir. Il constate que ce sont les famines qui se chargent de stabiliser l'expansion démographique, en supprimant « naturellement » les hommes et les femmes en surnombre. Cette vision pessimiste des choses l'amène à préconiser un contrôle actif de l'état pour empêcher la population de croître avant que les famines ne s'en chargent.

Il se trouve que l'entrée dans l'ère industrielle a rendu cette vision des choses obsolète à l'époque même de Malthus, en diminuant l'importance du secteur primaire au profit du secteur secondaire. Mais le processus mis en avant par Malthus peut néanmoins être généralisé, dans une certaine mesure.

Au Moyen Âge, la population se stabilisait naturellement quand une personne arrivait à produire tout juste de quoi vivre : une population plus importante finissait par entraîner des famines qui réduisaient ce nombre. Une population plus faible (par exemple suite à une épidémie) tendait naturellement à augmenter car des terres arables supplémentaires étaient disponibles, permettant à une seule personne d'en nourrir plusieurs.

En d'autres termes, la population se stabilisait quand une personne arrivait à produire tout juste la richesse dont elle avait besoin. Or ce constat reste d'actualité, même dans une société où le besoin de nourriture ne pilote plus la vie. Aujourd'hui, que ce soit par le biais de politiques natalistes ou de politiques d'immigration, les états cherchent à augmenter ou à diminuer la population de sorte à augmenter la richesse de chacun (PIB/habitant). La volonté d'augmenter la population caractérise l'Europe, tandis que la volonté de la diminuer a caractérisé la Chine des dernières décennies.

Bien sûr, d'autres paramètres viennent modifier cette tendance générale : le désir d'avoir des enfants ne se pilote pas uniquement par des arguments économiques... Mais dans un avenir encore lointain, cette volonté de

reproduction, jusqu'à présent inscrite dans les gènes par la sélection naturelle, tendra peut-être à s'atténuer : l'augmentation ou la diminution de population sera alors une simple conséquence des besoins économiques, la société recherchant le maximum de richesse pour chacun. Une telle évolution s'est déjà amorcée : pour accroître la richesse, les politiques natalistes cherchent à rendre plus ou moins « économique » la constitution d'une famille nombreuse...

Un réseau à très grande échelle

Le réseau commercial est basé sur l'existence de ponts quantiques reliant les systèmes planétaires deux à deux. La construction de ces ponts est justifiable si les étoiles sont distantes de quelques dizaines à quelques centaines d'années-lumière. Mais au-delà, la durée de construction, pilotée par cette distance en années-lumière, devient importante devant la durée de développement d'une civilisation. Une race n'a aucun intérêt à relier deux étoiles séparées par dix mille années-lumière, si sa durée de vie au sein du réseau commercial n'est que de dix mille ans : l'intérêt pour la nouvelle planète à conquérir aura disparu bien avant l'achèvement du pont quantique !

Ainsi, au sein de la galaxie mesurant 80 000 années-lumière, la construction des ponts quantiques s'est faite historiquement de proche en proche, jusqu'à s'étendre sur toute la Voie Lactée. Cela implique que le commerce d'un bout à l'autre de la galaxie n'est pas instantané : plus la distance à parcourir est importante, plus il faut emprunter un grand nombre de ponts quantiques de proche en proche. Si la longueur standard d'un pont quantique est de 100 années-lumière, alors il faut franchir 800 ponts pour traverser la galaxie d'un bout à l'autre...

Le problème apparaît plus crucial encore pour passer d'une galaxie à l'autre : ainsi la grande galaxie la plus proche de nous, celle d'Andromède, est à 2,5 millions d'années-lumière de distance ! Une question se pose aussitôt : qu'est-ce qui aurait pu

motiver la création d'un pont quantique aussi long reliant ces deux galaxies entre elles ?

En fait, l'espace intergalactique n'est pas tout à fait vide : il contient un grand nombre d'étoiles arrachées aux galaxies, notamment du fait de leur interaction gravitationnelle. La densité d'étoiles dans cet espace est encore très mal connue, mais il semble qu'elle soit d'au moins 0,1 % de celle d'une galaxie. Cette densité mille fois moins grande explique que l'espace intergalactique paraisse vide par rapport à la lumière intense des galaxies ; mais cela implique que les étoiles y sont distantes en moyenne de quelques dizaines d'années-lumière, ce qui n'est pas tellement considérable.

Ainsi, des ponts quantiques ont pu être construits de proche en proche dans l'espace intergalactique, de même qu'ils ont été construits de proche en proche au sein des galaxies. D'étoile en étoile, les réseaux commerciaux se sont étendus peu à peu à l'extérieur des galaxies jusqu'à ce qu'elles se retrouvent connectées entre elles, formant un seul immense réseau commercial à l'échelle du Superamas de la Vierge.

Au-delà du superamas, la densité d'étoiles est totalement inconnue, mais on peut imaginer qu'elle devient trop faible pour justifier la construction de ponts quantiques : si les étoiles sont distantes entre elles d'au moins 1 000 années-lumière, une civilisation n'a plus intérêt à poursuivre la colonisation, car en mille ans ses besoins peuvent évoluer radicalement.

Cela forme naturellement des réseaux de civilisations à l'échelle des superamas galactiques : chaque superamas reste aujourd'hui isolé des autres. Le nombre de civilisations connectées entre elles au sein de chaque réseau n'est donc pas infini : il est piloté par la taille du superamas.

Si on considère qu'une étoile sur cent est colonisable avec profit, alors les étoiles colonisables dans l'espace intergalactique sont

distantes d'environ 200 années-lumière, ce qui donne une idée de la longueur des ponts quantiques.

Reportons-nous à une lointaine époque où les galaxies n'étaient pas encore connectées : il ne naissait qu'une étoile colonisable tous les cent ans dans la galaxie, ce qui est du même ordre de grandeur que le temps nécessaire pour connecter deux étoiles colonisables dans l'espace intergalactique. Ainsi, les civilisations galactiques étaient bel et bien amenées à s'étendre naturellement de plus en plus loin au-delà de la Voie Lactée.

Civilisation après civilisation, l'expansion a dû prendre une dizaine de millions d'années avant que la jonction ne soit faite avec la galaxie d'Andromède. Quant au nombre total de ponts quantiques à franchir, il doit être aujourd'hui d'environ 10 000 !

Bien sûr, à condition que certaines étoiles intermédiaires perdent de leur intérêt, deux ponts successifs peuvent être « raboutés » entre eux pour former un seul pont deux fois plus long : cela réduit sensiblement le nombre de ponts à franchir entre deux galaxies...

Le Superamas de la Vierge et ses voisins

La répartition des galaxies au sein du superamas de la Vierge n'est pas uniforme : elles se répartissent en amas regroupant quelques dizaines d'entre elles. Parmi ces amas, deux ont une importance toute particulière : d'une part le « Groupe Local », auquel appartient la Voie Lactée. Il contient une quarantaine de galaxies, dont les deux principales sont la Galaxie d'Andromède et la Voie Lactée. D'autre part « l'Amas de la Vierge » (à ne pas confondre avec le Superamas de la Vierge qui englobe l'ensemble) : celui-ci est l'amas principal, particulièrement massif, présent au centre du superamas. Il contient notamment la galaxie « M87 », qui est la plus massive de toutes, avec dix fois plus d'étoiles que la Voie Lactée.

Par ailleurs, le Superamas de la Vierge est lui-même un superamas quelconque au sein de l'Univers. Parmi les autres superamas proches, celui de Shapley est assurément le plus intéressant : il s'agit d'un superamas extrêmement massif situé à 650 millions d'années-lumière de distance, vers

lequel notre Superamas de la Vierge semble irrésistiblement attiré. Cette masse attirant notre superamas a d'ailleurs pris le nom alléchant de « Grand Attracteur » : en effet, le superamas de Shapley est caché par le plan de notre galaxie, ce qui le rend difficile à observer, donc mystérieux...

Le rôle des vieilles civilisations

Le Superamas de la Vierge contient environ 200 civilisations en interaction commerciale, s'étendant sur 10 000 galaxies de tailles très variées : chaque civilisation s'étend donc sur un très grand nombre de galaxies. En d'autres termes, une race ne peut se contenter de sa galaxie originelle si elle souhaite rivaliser avec ses concurrentes...

Par ailleurs, cela signifie qu'une galaxie donnée n'abrite qu'une seule planète mère en général : en particulier, la Voie Lactée deviendra « la galaxie des Terriens », dans le sens où la Terre y sera la seule planète connectée au réseau commercial ayant développé sa propre civilisation. En revanche, chaque galaxie est susceptible d'abriter de nombreuses colonies : si une race s'étend sur un millier de planètes au cours de son développement, cela signifie qu'il y a de l'ordre de cent mille colonies connectées au réseau commercial dans le Superamas de la Vierge, soit une dizaine de colonies par galaxie en moyenne.

Enfin, à ces planètes mères très minoritaires et à leurs colonies, s'ajoutent toutes les vieilles civilisations qui sont sorties du réseau commercial, et qui occupent de loin la majorité des systèmes planétaires. En supposant une planète sur cent occupée, il ne nous reste pas moins d'un milliard de systèmes planétaires habités (ou ayant été habités) par d'antiques civilisations très évoluées, rien qu'au sein de la Voie Lactée ! La densité de civilisations appartenant au réseau commercial intergalactique fait pâle figure à côté...

Les ponts quantiques connectant les étoiles deux à deux, la

plupart mènent à des planètes abritant des vieilles civilisations, puisque celles-ci sont très majoritaires dans la galaxie. Ainsi, pour passer d'une colonie à une autre, une race doit nécessairement passer par un grand nombre de civilisations différentes, de proche en proche : pour que le réseau de ponts quantiques fonctionne, ces civilisations doivent les avoir maintenus en l'état.

Les vieilles races ayant quitté le réseau commercial, nous pourrions supposer qu'elles ne se préoccupent plus de l'entretien de ses ponts quantiques. Mais ce serait oublier qu'elles se sont elles-mêmes étendues sur un très grand nombre de galaxies : il est donc essentiel pour elles que les ponts quantiques fonctionnent, afin que leurs différentes colonies restent connectées. Ainsi, l'intérêt individuel pousse à maintenir en état un réseau qui profite à tout le monde : une race qui déciderait de « fermer ses ponts » se verrait aussitôt interdire l'accès des ponts des autres races, ce qui l'empêcherait de connecter ses différentes colonies. C'est ce qui fait la solidité à long terme d'un tel système.

Finalement, en atteignant la première planète extrasolaire en 2250, l'Humanité a toutes les chances de déboucher sur une colonie de l'une de ces « vieilles civilisations », sorties depuis longtemps du réseau commercial intergalactique. Mais cette planète n'en reste pas moins connectée au réseau par le biais d'un pont quantique : en atteignant cette planète, l'Humanité a bel et bien atteint les rivages de la Civilisation Intergalactique...

Le Superamas de la Vierge en chiffres

- Nombre de galaxies : environ 10 000 (10^4)
- Nombre d'étoiles : environ un million de milliards (10^{15})
- Nombre total de races : dix milliards (10^{10})
- Nombre total de systèmes planétaires colonisés : environ dix mille milliards... (10^{13})

- Nombre de races actives au sein du réseau commercial : 200 ($2 \cdot 10^2$)
- Nombre de systèmes planétaires colonisés par des races actives : 100 000 (10^5)
- Nombre de nouvelles étoiles naissant chaque siècle : environ 10 000 (10^4)
- Nombre de civilisations rejoignant ou quittant le réseau commercial à chaque siècle : 2 ($2 \cdot 10^0$)
- Distance moyenne entre deux étoiles d'une galaxie : 1 à 10 années-lumière
- Diamètre d'une galaxie : environ 100 000 années-lumière
- Distance moyenne entre deux étoiles de l'espace intergalactique : 100 années-lumière (?)
- Distance moyenne entre deux galaxies : de 100 000 à 1 million d'années-lumière
- Taille du Superamas de la Vierge : 200 millions d'années-lumière (?)

Un cycle de civilisations perpétuel ?

Quant à imaginer à quoi pourraient ressembler ces anciennes civilisations dont l'âge se compte en millions d'années, c'est une entreprise bien délicate... Finissent-elles par atteindre un « équilibre perpétuel », évoluant peu par la suite ? S'éteignent-elles naturellement, pour une raison ou pour une autre ? Dans ce deuxième cas, elles laisseraient sans doute des planètes grouillantes de vie derrière elles, planètes qui pourraient alors recréer une nouvelle forme de vie intelligente en quelques millions à dizaines de millions d'années, par le biais de la sélection naturelle. Une nouvelle civilisation primitive finirait ainsi par succéder à la civilisation éteinte.

L'évolution de cette nouvelle civilisation serait sans doute assez différente de celle de l'Humanité sur Terre, car la précédente civilisation aurait nécessairement contribué à transformer la planète : exploitation de ses ressources, présence de vestiges technologiques... Ainsi, si l'Humanité venait à s'éteindre aujourd'hui et était remplacée demain par un descendant du

chimpanzé, la nouvelle civilisation serait confrontée à une Terre déjà largement transformée. Par exemple, tous les gisements naturels de cuivre ou de fer les plus accessibles auraient disparu, déjà exploités par notre civilisation : une nouvelle société néolithique similaire à celle qui s'est mise en place dans le passé paraît inenvisageable. À l'inverse, la nouvelle civilisation pourrait profiter de certains vestiges technologiques laissés à l'abandon par l'Humanité...

Un tel scénario augmenterait fortement le nombre de civilisations connectées au réseau commercial. Supposons que la durée de vie d'une civilisation soit de dix mille ans, et qu'il faille dix millions d'années avant qu'une autre ne lui succède. S'il y a dix milliards de races dans le Superamas de la Vierge, cela en laisse dix millions connectées au réseau galactique, au lieu des 200 initialement envisagées... Par ailleurs, le réseau commercial connaîtrait l'arrivée (et le départ) de mille nouvelles civilisations par an, au lieu de deux par siècle !

Cela déclencherait-il une compétition impitoyable pour la conquête des nouvelles planètes ? Non, car une civilisation née sur les vestiges d'une ancienne n'aurait pas les mêmes besoins que l'Humanité aujourd'hui. En effet, l'ancienne civilisation se serait déjà chargée de coloniser environ un millier de planètes dans le superamas : ces mille planètes seraient donc déjà oxygénées, et abriteraient un écosystème « bio-compatible », puisque issu de la même planète mère. La nouvelle civilisation aurait donc déjà largement de quoi faire avec la « recolonisation » de ces planètes accueillantes.

Finalement, les planètes abritant la civilisation pour la première fois, comme la Terre, auraient un statut bien particulier : les deux cents civilisations concernées seraient les seules à être intéressées par la colonisation des nouvelles planètes naissant chaque année dans le superamas. Le nombre de civilisations en compétition

pour la colonisation ne serait donc pas plus élevé dans l'hypothèse de ce « cycle perpétuel de civilisations ».

Il faut toutefois mentionner une faiblesse dans ce scénario : il implique que sur l'ensemble des civilisations entrant dans le réseau galactique, il n'y en aurait qu'une sur 50 000 qui ne serait pas née sur les vestiges d'une ancienne civilisation. Le cas de l'Humanité sur Terre serait donc exceptionnel par rapport à ce qui se produit en général : en d'autres termes cela impliquerait que nous, humains, n'avions qu'une chance sur 50 000 de naître sur une terre n'ayant jamais vu la marque d'une ancienne civilisation. Un scénario qui fait de la Terre un tel « cas à part » est forcément suspect...

Il paraît donc plus « raisonnable » de penser qu'une vieille civilisation atteigne un équilibre perpétuel, ou bien que ses actions sur les planètes colonisées empêchent définitivement l'émergence de futures civilisations. Cette dernière hypothèse paraît assez sensée : il n'est pas impossible qu'une civilisation ayant acquis un contrôle très poussé de la Nature rompe définitivement l'évolution naturelle des espèces animales, d'une manière ou d'une autre.

Cela expliquerait qu'une nouvelle civilisation ne puisse émerger que sur des planètes n'ayant jamais développé l'intelligence auparavant : l'exemple de l'Humanité sur Terre redevient le « cas d'école » en vigueur dans le Superamas de la Vierge. Si la Terre avait déjà abrité une ancienne civilisation par le passé, nous n'existerions pas...

Le témoignage minéral de la Terre

Au néolithique, l'Homme a profité de la présence de roches minérales affleurant à la surface, notamment le cuivre (intervenant dans la fabrication du bronze), puis le fer un peu plus tard. Ces matériaux permirent de créer des outils beaucoup plus solides, renforçant à la fois la productivité agricole

et l'efficacité des armes. Ces deux éléments ont traversé les siècles et les millénaires jusqu'à aujourd'hui, où ils sont toujours aussi précieux.

L'existence même de cuivre et de fer affleurant à la surface au début de l'histoire de l'Humanité est une belle preuve attestant l'absence d'anciennes civilisations installées jadis sur Terre, et qui auraient cédé la place à l'Homme : si une civilisation s'était développée sur Terre il y a plusieurs millions d'années, elle aurait certainement utilisé ces gisements facilement accessibles jusqu'à les épuiser. De fait, ces gisements ont disparu aujourd'hui sous l'action des hommes, qui doivent désormais creuser des mines de plus en plus profondes ou se contenter de minerais de moins en moins purs.

Certes, la croûte se renouvelle par le biais du volcanisme et de la tectonique des plaques, mais cela ne suffit pas pour renouveler les gisements à une échelle de 10 millions d'années : certains gisements de fer exploités aujourd'hui ont été formés il y a plus de 2,4 milliards d'années, c'est-à-dire avant même que le dioxygène ne commence à s'accumuler dans l'atmosphère...

Scénario 2 : L'Humanité à la conquête de la Galaxie

Une révolution dans les domaines aéronautique et aérospatial

2060 : Après une longue période de stagnation, les techniques de lancement des engins spatiaux évoluent sensiblement. Les vieilles fusées avaient un double inconvénient : d'une part presque toute leur masse était due au carburant transporté. Autrement dit, presque toute l'énergie du carburant servait à soulever le carburant lui-même plutôt que la charge utile, entraînant un gaspillage d'énergie considérable. D'autre part, l'énergie acquise par l'engin satellisé n'était pas récupérée par la suite : lors de son retour sur Terre, la navette spatiale était simplement freinée par l'atmosphère, perdant toute l'énergie acquise lors du lancement, sous forme thermique (échauffement de l'atmosphère et de la

navette). Outre cette non-récupération de l'énergie du lancement, cela entraînait une érosion systématique de l'engin qui fondait littéralement en raison des températures considérables rencontrées. Les frais d'entretien étaient donc gigantesques.

Avec les nouveaux modes de propulsion MHD (magnétohydrodynamique) mis au point, tous ces problèmes se trouvent peu à peu résolus, réduisant les coûts de lancement de façon prodigieuse. Avec cette technique, l'atmosphère elle-même est utilisée pour la sustentation comme pour la propulsion : une fois les couches d'air ionisées autour de l'engin, elles peuvent exercer des forces très importantes capables de le soulever ou de le propulser vers l'avant.

Plus l'engin monte en altitude, plus l'air est raréfié, mais plus la vitesse de l'engin augmente grâce à la diminution des frottements : ainsi la quantité d'air rencontrée à chaque seconde reste importante, ce qui permet de poursuivre l'accélération jusqu'à atteindre les vitesses de satellisation ou d'échappement. Finalement, à l'inverse de la fusée, le dispositif de propulsion est externe (atmosphère), et non interne (gaz brûlés éjectés par les tuyères) : le gain en masse est considérable. L'énergie à emporter ne sert plus à accélérer les gaz de la fusée, mais à ioniser l'air extérieur : cette énergie est bien plus raisonnable puisque l'engin a une masse beaucoup plus faible.

De plus, l'énergie dépensée pour le lancement n'est plus intégralement perdue : lors de son retour dans l'atmosphère, l'engin ionise à nouveau l'air qui le freine fortement en retour. Cela réduit sa vitesse avant que les frottements ne chauffent démesurément la structure. Une part de l'énergie de freinage peut alors être récupérée par la fusée, et n'est plus dissipée sous forme thermique. L'engin peut ainsi atterrir au sol sans avoir subi de dommages dus à l'érosion par les frottements : les coûts d'entretien s'en trouvent fortement réduits.

Il faudra encore plusieurs décennies avant que les différents avantages de la MHD soient exploités au maximum, mais cela promet déjà une révolution dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale.

Pour ce qui est de la propulsion dans le vide spatial, le principe du moteur de fusée est conservé, mais les engins spatiaux connaissent eux aussi des améliorations sensibles. Le développement de bases sur la Lune s'intensifie.

Par ailleurs, malgré l'amélioration des techniques de détection, aucune présence extraterrestre n'est encore détectée dans la galaxie.

La propulsion MHD aujourd'hui

L'idée d'utiliser l'atmosphère pour gagner de la vitesse et de l'altitude n'est pas neuve : c'est le principe même des avions, qui utilisent l'air pour la sustentation (par les ailes) comme pour la propulsion (par les hélices ou les turboréacteurs). Plus un avion monte en altitude, plus les frottements de l'air diminuent, ce qui devrait permettre d'augmenter considérablement la vitesse de l'appareil, maintenant une sustentation suffisante : dans ce cas, qu'est-ce qui empêche un avion d'atteindre sa vitesse de satellisation ?

En fait, la vitesse d'un avion est principalement limitée par le « mur du son » : quand l'appareil dépasse la vitesse du son, il se forme comme un bouchon de molécules d'air à l'avant de l'avion, qui n'ont plus le temps d'être repoussées sur les côtés à cause de la trop grande vitesse de l'appareil. Pour « percer ce bouchon », les avions supersoniques possèdent des nez pointus, à l'opposé des « nez ronds » propres aux avions traditionnels. Mais il n'en reste pas moins que ce mur du son crée une résistance considérable, qui empêche l'avion de trop accélérer.

Le grand intérêt de la MHD est de faire disparaître ce bouchon de molécules, en « modelant » l'écoulement de l'air après l'avoir ionisé : les vitesses atteintes à haute altitude peuvent alors devenir considérables.

Pourtant, aucun aéronef n'utilise la MHD à ce jour, malgré les nombreuses recherches à ce sujet menées dans les années soixante et soixante-dix. La raison réside dans l'instabilité inhérente à ce type de dispositifs, et dans la masse trop élevée des électroaimants à embarquer. L'avènement des supraconducteurs, en autorisant des champs magnétiques plus élevés,

pourrait toutefois résoudre certains de ces problèmes dans un avenir assez proche. Il est clair que la maîtrise d'une propulsion MHD révolutionnerait le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale...

À la conquête du Système Solaire

2100 : L'établissement de bases permanentes et autonomes sur Mars est engagé, après que l'absence d'embryon ou de fossile de vie sur cette planète a été confirmée. L'utilisation commerciale d'aéronefs MHD dans l'atmosphère terrestre se démocratise, en remplacement des avions de ligne devenus beaucoup plus chers du fait de la disparition des ressources pétrolières.

L'absence du moindre signe de vie dans le Système Solaire et dans la Galaxie (présence de dioxygène, émission d'ondes radios...) rend les ambitions spatiales très modestes en dehors du proche environnement terrestre (explosion du nombre de satellites et de transports suborbitaux). Seule Mars continue à conserver un certain intérêt international, grâce au dynamisme de la Chine et de l'Inde.

2150 : La réduction du coût des vaisseaux spatiaux a engagé une véritable course à la colonisation de Mars, qui connaît une croissance exponentielle. Les colonies se développent à l'intérieur de gigantesques bâches transparentes de la taille d'une ville, qui forment comme d'énormes bulles de dioxygène. Des étangs d'eau liquide sont créés à l'intérieur. La population de colons martiens dépasse le seuil de renouvellement naturel. La société, constituée jusqu'alors principalement de scientifiques, évolue en devenant de plus en plus hétéroclite. Tous les métiers sont peu à peu représentés.

Un projet de vaisseau interstellaire inhabité à destination d'Alpha du Centaure commence à être envisageable à cette époque.

2200 : Départ d'un vaisseau international pour Alpha du Centaure, située à 4,3 années-lumière de distance. Sa vitesse de croisière est égale à 10 % de celle de la lumière environ. Il ne peut effectuer qu'un simple survol du système sans pouvoir s'y satelliser.

2250 : Les premières données en provenance du vaisseau arrivent sur Terre. L'absence de vie sur Alpha du Centaure est confirmée, malgré la présence d'eau liquide en petite quantité. L'exploration de nouveaux mondes provoque un certain engouement auprès du grand public, mais le coût des vaisseaux interstellaires reste trop élevé pour engager un véritable programme d'exploration de l'environnement galactique proche. Le temps nécessaire avant d'obtenir les résultats rend de plus les politiques très réticents.

2300 : Le problème de manque d'eau sur Mars commence à se faire sentir, ce qui tend à y freiner l'augmentation de population. L'eau devient l'une des marchandises les plus précieuses dans les importations martiennes depuis la Terre.

Le manque d'eau H_2O sur Mars est dû au manque d'hydrogène H , celui-ci s'étant échappé au début de son Histoire. À cette époque, émerge donc l'idée d'amener de l'hydrogène sur Mars et de le transformer en eau sur place : l'intérêt réside dans la masse neuf fois plus faible du dihydrogène H_2 par rapport à l'eau H_2O , ce qui permet de diminuer considérablement les coûts de transport, et d'augmenter fortement les flux de marchandises.

Dans cette optique, un projet de base sur Europe (satellite de Jupiter) est à l'étude, vouée à servir de relais de proximité dans l'exploitation de l'atmosphère de Jupiter. L'intérêt est double : d'une part celle-ci fournit une quantité d'hydrogène illimitée et facile d'accès, qui peut ensuite être amenée sur Mars pour être

transformée en eau. D'autre part il s'agit d'une source tout aussi illimitée de deutérium et de tritium, qui sont des espèces précieuses dans le cadre de la fusion nucléaire. Le rôle des bases d'Europe est de purifier le mélange extrait de Jupiter pour isoler le deutérium et le tritium.

Le faible coût du transport spatial permet de rendre ce concept d'exploitation à l'échelle du Système Solaire de plus en plus viable.

2400 : Une présence humaine sur Europe est mise en place. Contrairement au cas de Mars, il ne s'agit pas d'une « colonisation » : les bases placées sur ce satellite restent à vocation purement industrielle, et elles sont totalement dépendantes de la Terre. Les flux d'hydrogène, de deutérium et de tritium à destination de Mars et de la Terre prennent rapidement une grande ampleur. Les sociétés multinationales chargées de l'exploitation, de la purification, et du transport de ces matières premières prennent un grand ascendant en s'enrichissant de façon considérable.

L'expansion démographique sur Mars reste très lente malgré ces apports extérieurs. L'Humanité atteint un équilibre durable à l'échelle du Système Solaire.

La terraformation de Mars, une utopie ?

La terraformation d'une planète consiste à transformer son atmosphère et sa surface de sorte qu'elle puisse accueillir un écosystème stable importé de la Terre. Dans le cas de Mars, les transformations à apporter sont colossales : trop faible quantité d'eau, absence de dioxygène, absence de renouvellement du dioxyde de carbone par le volcanisme, qui est pourtant indispensable à la vie...

On peut toujours imaginer que dans un lointain avenir, il soit possible de créer chimiquement toutes ces espèces pour maintenir artificiellement un écosystème en place. Mais encore faut-il que les éléments constituant ces

molécules soient présents. Par exemple, pour créer de l'eau H_2O , il faut forcément de l'hydrogène H et de l'oxygène O sous une forme ou sous une autre. Or l'énorme problème existant sur Mars est la quasi-absence d'hydrogène. Celui-ci est encore présent aujourd'hui sous forme H_2O dans le sol martien, mais en quantité bien trop faible pour espérer recréer de véritables océans. La présence de mers est pourtant indispensable pour amorcer un cycle de l'eau qui puisse alimenter la faune et la flore.

L'hydrogène pourrait toujours être amené depuis une autre planète, par exemple Jupiter. Mais la quantité qu'il faudrait alors « transborder » serait véritablement effrayante : rien que pour une petite mer de 1 000 km de côté et de 10 mètres de profondeur, il faudrait dix millions de milliards de kilos d'eau... En imaginant des vaisseaux spatiaux géants capables de transporter dix mille tonnes d'eau, il faudrait alors un milliard d'allers-retours pour créer cette petite mer ! On peut aussi imaginer détourner de leur trajectoire des comètes riches en eau pour qu'elles entrent en collision avec Mars, mais les quantités d'énergie en jeu sont démentiellées...

Il est donc possible que la terraformation d'une exoplanète soit terminée bien avant celle de Mars : la vision futuriste de Mars couverte de mers et de végétation semble bel et bien utopique...

La tête dans les étoiles

Les énergies de plus en plus grandes exploitées dans le Système Solaire rendent le voyage interstellaire abordable vers 2400. Un vaisseau spatial à antimatière est conçu à cette époque : trop cher pour le transport interplanétaire en raison des coûts de fabrication de l'antimatière, il diminue en revanche fortement les coûts de voyage interstellaire, en abaissant considérablement la masse de carburant à embarquer.

2450 : Envoi du premier vaisseau interstellaire inhabité à propulsion antimatière, à destination de l'étoile 61 Cygni située à 11,4 années-lumière. Le voyage doit durer 40 ans. De nombreux autres vaisseaux suivront à destination des étoiles les plus proches du Système Solaire. Les vitesses atteintes, qui tournent d'abord autour de 30 % de celle de la lumière, dépassent peu à peu les

50 %.

2600 : Les sondes interstellaires, tout comme les observations depuis la Terre, confirment la solitude de l'Humanité en tant qu'unique vie intelligente dans ce coin de galaxie. Une dizaine de systèmes planétaires sont explorés à ce jour, le plus lointain étant celui de Tau Ceti situé à 11,9 années-lumière de distance. Aucune vie primitive n'est observée : la vie apparaît comme un phénomène rarissime requérant des conditions environnementales très particulières.

L'eau liquide apparaît abondante, mais l'absence de dioxygène rend les perspectives de colonisation moins attrayantes. Des projets de terraformation émergent afin de rendre certaines exoplanètes habitables : la création de dioxygène par les cyanobactéries étant trop lente pour obtenir un résultat en quelques centaines d'années, l'idée est de construire des centrales de production sur place. L'eau liquide des océans doit alors servir à la fois de source d'énergie pour les centrales nucléaires (en tant que réservoir de deutérium : c'est le H du H_2O qui est utilisé), et à la fois de matière première à partir de laquelle le dioxygène est formé (c'est alors le O du H_2O qui nous intéresse).

Un tel dispositif à grande échelle requiert une présence humaine importante sur place pour la construction et l'entretien de ces immenses structures. C'est ce qui motive la mise en place des premiers vaisseaux interstellaires habités. La présence d'êtres humains à bord augmente considérablement la taille des vaisseaux à concevoir, la durée du trajet imposant un certain confort à l'intérieur. Par ailleurs, pour que les temps de transport perçus par les passagers ne dépassent pas quelques années, la vitesse maximale atteinte par le vaisseau doit être très proche de celle de la lumière, ce qui nécessite une quantité de carburant très

importante.

2650 : Le premier vaisseau interstellaire habité est achevé. Il emporte une centaine de personnes chargées d'établir une première colonie « sous bulle » sur une planète d'Alpha du Centaure. D'autres vaisseaux habités suivront pour permettre la construction des centrales nucléaires et des usines de production de dioxygène.

Pendant ce temps, des régions de plus en plus lointaines sont explorées par les sondes : plusieurs centaines d'étoiles sont atteintes dans un rayon de cinquante années-lumière.

2900 : Le taux de dioxygène dans l'atmosphère de la planète d'Alpha du Centaure devient suffisant pour s'affranchir des « bulles » à l'intérieur desquelles les colonies s'étaient développées. Un phénomène d'immigration massive s'amorce depuis la Terre. L'information génétique de la plupart des espèces d'animaux et de végétaux terrestres est apportée sur Alpha du Centaure : l'écosystème terrestre est peu à peu « reconstitué » sur place. En particulier, l'introduction du phytoplancton permet de maintenir le taux de dioxygène en place, tout en réduisant sa production par les usines.

Devant le succès de l'opération de terraformation, des projets similaires voient le jour pour la colonisation d'autres systèmes planétaires.

3000 : La planète coloniale d'Alpha du Centaure atteint le seuil de renouvellement naturel. Des flux commerciaux s'amorcent avec la Terre. La population d'Alpha du Centaure dépasse rapidement la population martienne, celle-ci restant bridée par les ressources limitées en eau, malgré les importations massives. Outre le

problème de l'eau, l'absence d'activité interne rend la terraformation de Mars inenvisageable : faute de dioxyde de carbone dégazé par le volcanisme, la vie ne peut pas se multiplier sur cette planète, et aucun écosystème martien ne peut se mettre en place. La vie, l'eau liquide, et le dioxygène, restent principalement concentrés à l'intérieur des cités-bulles.

Description des étoiles les plus proches

20 étoiles ou systèmes d'étoiles se trouvent à moins de 12 années-lumière de la Terre (en comptant le Soleil). 12 d'entre elles sont des naines rouges ou des systèmes de naines rouges : il s'agit souvent d'étoiles de forte variabilité liée à leur faible masse, et leur colonisation pourrait donc être difficile. C'est le cas notamment de Proxima du Centaure (à 4,2 années-lumière), et de l'étoile de Barnard (à 6 années-lumière : c'est l'étoile la plus proche après le système d'Alpha du Centaure).

Voici les 8 étoiles ou systèmes d'étoiles qui ne sont pas des naines rouges (rappel : 1 UA = distance Terre-Soleil) :

Nom	Type	Distance (années-lumière)	Commentaire
Soleil	étoile jaune	0	
Alpha du Centaure A et B	système de naines jaunes	4,3	Les deux étoiles orbitent entre 11,2 et 35,6 UA l'une de l'autre
Sirius	étoile blanche lumineuse	8,6	Elle est accompagnée d'une naine blanche, vestige d'une ancienne étoile plus massive aujourd'hui éteinte, orbitant entre 8,1 et 31,5 UA de

			l'étoile.
Epsilon Eridani	étoile jaune orange	10,5	Étoile jeune (moins d'un milliard d'années) qui possède encore un disque de poussières ainsi que des ceintures d'astéroïdes. Des planètes géantes y ont été détectées.
Procyon	étoile blanche	11,4	Elle est accompagnée d'une naine blanche, orbitant entre 9 et 21 UA de l'étoile
61 Cygni A et B	système de 2 étoiles orangées	11,4	Les deux étoiles orbitent entre 44 et 124 UA l'une de l'autre
Epsilon Indi	étoile orangée	11,8	Elle est accompagnée d'un système de deux naines brunes (embryons d'étoiles trop peu massifs pour avoir pu s'allumer), orbitant à 2,6 UA l'une autour de l'autre. Ces deux naines brunes sont à 1 500 UA de l'étoile.
			C'est la plus semblable au Soleil

Tau Ceti	étoile jaune	11,9	parmi toutes les étoiles proches, mais avec un plus grand âge et une plus faible proportion en éléments lourds.
----------	-----------------	------	--

L'existence de planètes telluriques autour d'Alpha du Centaure, de Sirius et de Procyon n'est pas garantie, car la présence du couple stellaire pourrait avoir gêné leur formation. Par ailleurs, l'environnement d'Epsilon Eridani pourrait être encore assez hostile car la formation des planètes semble ne pas y être tout à fait terminée (nombreux impacts de météorites en perspective...).

Finalement, 61 Cygni A et B, Epsilon Indi et Tau Ceti, toutes situées entre 11 et 12 années-lumière de distance, pourraient être les meilleures candidates pour l'installation des premières colonies humaines extrasolaires. Ce sont aussi les meilleures candidates à l'émergence de la vie, dans le cas du scénario optimiste proposant une galaxie grouillante de vie...

Chronologie de la colonisation de la Galaxie

4000 : Un véritable réseau de planètes coloniales s'est mis en place dans le proche environnement du Soleil, dans une zone de quelques dizaines d'années-lumière de rayon. La Terre a quelque peu perdu son rôle prééminent en devenant une planète vivante parmi d'autres, mais conserve son prestige en tant que « planète mère ». Les nouvelles colonisations ne se font plus nécessairement à partir de la Terre, mais à partir des planètes déjà colonisées : l'expansion de l'Humanité continue ainsi à se faire de proche en proche. Les colonisations se font dans toutes les directions, et la Terre reste donc plus ou moins au centre de cette bulle d'expansion.

La faible taille du domaine galactique colonisé permet à toutes les

planètes de commercer ensemble, mais les flux commerciaux sont naturellement plus importants entre deux planètes proches, étant donné les temps de transport considérables (une dizaine d'années en moyenne). Pour compenser les frais liés aux très longs délais, les marchandises sont transportées en grandes quantités dans des vaisseaux-cargos gigantesques. Une caste de marchands interstellaires émerge naturellement : leurs voyages à des vitesses proches de la lumière les amènent à voyager tout autant dans l'avenir. Cela permet de diminuer considérablement la durée du voyage de leur point de vue, mais cela leur interdit toute attache sur une planète en particulier, puisque les sédentaires y vieillissent de plusieurs dizaines d'années entre chaque aller-retour. Des liens se créent donc naturellement à l'intérieur de cette caste de marchands, qui tend à se forger une identité très distincte de celle des sédentaires.

5000 : La bulle d'expansion s'étend maintenant jusqu'à plusieurs centaines d'années-lumière autour de la Terre. Les planètes les plus distantes ne sont alors plus en interaction directe, et n'ont que très peu de liens entre elles. Chaque planète est au centre d'un réseau commercial qui s'étend sur plusieurs dizaines d'années-lumière, et inclut une centaine de planètes environ. En particulier, la Terre n'a plus de contact étroit avec les planètes situées sur les marges de cette bulle d'expansion : la civilisation sur Terre atteint un équilibre naturel, et n'est plus concernée par l'expansion de l'Homme dans la Galaxie. L'écartèlement géographique de l'Humanité fait disparaître tout centre politique commun à l'ensemble. L'entité politique de base devient la planète-état, tandis que la guilde des marchands reste une puissance autonome particulièrement présente là où les planètes sont les plus interdépendantes.

Par ailleurs, l'augmentation considérable de la longévité de l'Homme permet de rendre les longs trajets de plus en plus

viables : une commande peut être honorée en un laps de temps très court par rapport à une vie humaine.

8000 : L'Humanité s'étend à présent sur toute l'épaisseur de la galaxie : son expansion, qui se faisait jusqu'à présent uniformément dans toutes les directions, se poursuit donc préférentiellement dans le plan galactique. L'Humanité s'étend alors déjà sur plus d'un million de systèmes planétaires ! Les planètes à partir desquelles sont fondées les nouvelles colonies étant de plus en plus nombreuses, la conquête de nouveaux systèmes se fait à une vitesse de plus en plus grande.

Seuls de rares embryons de vie primitive ont été détectés sur certaines planètes, à un stade proto-cellulaire.

20 000 : L'expansion de l'Humanité se fait à présent davantage en direction du centre galactique, où la densité d'étoiles est plus grande. Les liens entre les systèmes planétaires y sont beaucoup plus forts, du fait de leur proximité. La densité de population y devient bien plus importante que dans les régions externes où se trouve la Terre. La guilde des marchands y acquiert une puissance forte, non seulement économique mais aussi politique et militaire. Elle domine nettement les régimes politiques planétaires et tend à former une autorité à beaucoup plus grande échelle.

Les écosystèmes des différentes planètes colonisées se sont fortement individualisés, chacun évoluant dans une direction différente selon les conditions environnementales de la planète. De nouvelles espèces émergent, renforçant cette différenciation. La maîtrise de la génétique accélère ces évolutions.

150 000 : L'Humanité s'est étendue sur toute la galaxie, à l'exception des régions les plus proches du trou noir central, dont l'environnement est trop agressif. L'absence d'autre vie intelligente dans la galaxie est confirmée. À cette époque, les progrès dans tous les domaines ont rendu l'Homme méconnaissable par

rapport aux débuts de la conquête de la Galaxie...

La vie des marchands interstellaires

Pour imaginer à quoi pourrait ressembler le commerce interstellaire, il faut bien distinguer deux cas possibles. Le premier, qui reste ancré dans les connaissances actuelles, considère qu'un vaisseau habité ne peut pas accélérer trop fortement sous peine d'écraser les passagers à l'arrière. La durée minimale du trajet pour les voyageurs serait alors de plusieurs années, même entre des étoiles voisines : il est probable que dans ces conditions, l'Humanité préférerait des vaisseaux sans pilote, totalement automatisés. Dans ce cas, la caste des marchands n'existerait tout simplement pas.

Pour que la durée de voyage soit ramenée à quelques semaines du point de vue du passager, il faudrait que celui-ci ne soit pas gêné par des accélérations considérables. Seule la force gravitationnelle est capable d'une telle chose, mais elle est bien trop faible pour pouvoir jouer efficacement ce rôle.

Imaginons néanmoins qu'on résolve un jour le problème (la création d'hypothétiques particules « exotiques » dans les futurs accélérateurs de particules laisse le champ ouvert à ce niveau...). Au cours d'un aller-retour entre deux étoiles distantes de 10 années-lumière, il ne s'écoulerait que quelques semaines pour le marchand qui seraient 20 ans pour les sédentaires. Avec une espérance de vie de cent ans, un marchand pourrait voir défiler 5 000 ans sur les planètes au cours de sa vie ! Cela lui donnerait une vision « cosmique » des événements, au niveau spatial comme temporel, en rendant la vie des sédentaires aussi minuscule et éphémère que celle d'un insecte...

L'absence de lien durable possible avec les sédentaires forgerait assurément une identité propre, les marchands se revendiquant probablement comme « caste supérieure ». Mais si les liens avec les sédentaires sont impossibles, pourraient-ils en revanche créer des liens durables entre eux ? Imaginons que deux marchands soient basés sur une même planète, mais commercent avec deux planètes différentes, disons respectivement à 10 et à 15 années-lumière. Alors il s'écoulerait 20 ans pour le premier quand 30 ans défileraient pour le second : ils ne pourraient pas se revoir après leur aller-retour, à moins que le premier n'attende son compagnon pendant 10 ans...

Une astuce pour résoudre ce problème est d'intervertir systématiquement les deux trajets : le premier marchand fait l'aller-retour de 20 ans, puis l'aller-retour de 30 ans, pendant que l'autre fait celui de 30 ans avant celui

de 20 ans : finalement, dans les deux cas, il s'est écoulé 50 ans sur les planètes, quelques mois pour les deux marchands. Les deux marchands peuvent donc se retrouver tous les deux trajets sur leur planète d'origine : à condition que la guilda des marchands organise judicieusement son commerce, des liens forts peuvent bel et bien se tisser entre les marchands, autant qu'entre sédentaires.

Tout se passe comme si deux sociétés se côtoyaient, celle des sédentaires et celle des marchands, mais sur des échelles spatiales et temporelles différentes. Un beau sujet de science-fiction...

Comparaison des deux scénarios

Des scénarios « extrêmes »

Dans ce qui précède, nous avons essayé de mettre en avant les deux scénarios les plus extrêmes : d'une part un réseau de galaxies grouillantes de vie intelligente, bénéficiant de possibilités technologiques « futuristes », qui exploitent des propriétés physiques nouvelles par rapport aux connaissances actuelles. D'autre part une Humanité désespérément seule, qui constitue la première vie intelligente à conquérir la Voie Lactée depuis les débuts de l'Univers, et qui reste définitivement contrainte par la terrible limitation de la vitesse de la lumière.

Selon le scénario envisagé, la vitesse des progrès à venir apparaît radicalement différente : la détection d'une civilisation extraterrestre accélérerait considérablement les efforts dans le domaine spatial, contrairement à la perspective d'un environnement inerte. C'est ce qui s'est passé de nombreuses fois dans l'Histoire de la Terre : les explorations et les progrès associés ont toujours été motivés par la présence d'autres civilisations lointaines avec qui échanger.

Ainsi, le premier vaisseau interstellaire inhabité renvoie ses informations en l'an 2125 dans le premier scénario, et seulement en 2250 dans le deuxième. Quant au premier voyage de l'Homme

vers une autre étoile, les dates sont respectivement de 2400 et 2650... Par la suite, la possibilité de dépasser la vitesse de la lumière crée une divergence encore plus forte entre les deux scénarios.

Bien entendu, d'autres « intermédiaires » peuvent être envisagés. Ils dépendent notamment des découvertes scientifiques à venir : en chimie et en biologie, cela dépend si les conditions d'apparition de la vie sont extrêmement contraignantes. En physique, cela dépend de l'existence d'éventuelles « astuces » pour contourner la limitation de la vitesse de la lumière.

À ce niveau, il faut bien avoir à l'esprit que tout n'est pas permis : imaginons par exemple qu'il soit possible de créer des vaisseaux spatiaux dotés d'une « hyperpropulsion », leur permettant de gagner un « hyperespace » par le biais duquel ils pourraient relier plus rapidement deux points de la galaxie. La limitation de la vitesse de la lumière disparaîtrait purement et simplement. Cela signifie que l'horizon de l'univers observable ne serait plus une limitation empêchant le contact entre deux civilisations distantes : par exemple, une civilisation extraterrestre située à 20 milliards d'années-lumière de distance pourrait très bien nous avoir rejoints aujourd'hui, bien que l'Univers n'ait que 14 milliards d'années d'âge.

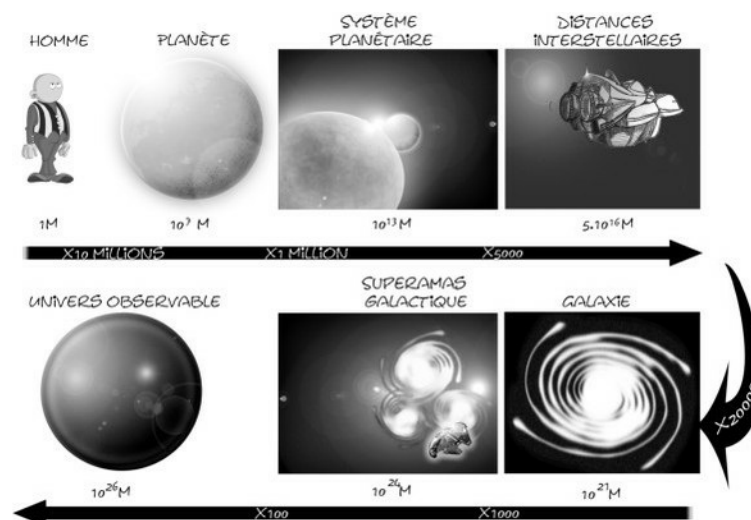
Si l'Univers est homogène et infini, alors il y a forcément d'autres civilisations qui ont émergé ailleurs dans l'Univers. Et si la vitesse de la lumière est dépassable à l'infini, alors ces civilisations ont toutes pu atteindre notre galaxie au cours de leur expansion naturelle. De plus, notre Système Solaire ne serait alors plus « protégé » par les grandes distances interstellaires à parcourir, et l'absence constatée d'extraterrestres en deviendrait plus étonnante encore.

C'est la raison pour laquelle le concept fictif du « pont quantique » est davantage plausible : la construction d'un tel pont

serait limitée par la vitesse de la lumière, ce qui créerait une difficulté supplémentaire dans les tentatives de colonisation, et permettrait de mieux expliquer notre apparente solitude. Mais une fois achevé, le pont permettrait de connecter les systèmes planétaires entre eux, ce qui est une condition indispensable pour envisager des « races » différentes commerçant entre elles dans la galaxie.

Synthèse sur les échelles en jeu

Le schéma ci-dessous, qui correspond aux très grandes échelles, est à comparer avec celui du premier chapitre concernant les échelles microscopiques. Un facteur « dix milliards » sépare l'échelle de l'Homme de celle de l'atome, alors qu'un facteur « cent milliards » sépare l'échelle de l'Homme de la distance Terre-Soleil : cela donne une idée de l'immensité des distances séparant deux étoiles (presque un million de fois la distance Terre-Soleil !)...



D'autres scénarios moins agréables...

Par ailleurs, chacun des deux scénarios présentés contient un certain écueil qu'il est difficile d'éviter. Le deuxième scénario sous-entend que nous sommes seuls malgré les centaines de milliards d'étoiles dans la galaxie, dont un certain nombre abrite

sans doute des planètes en tous points similaires à la Terre. La difficulté extrême à créer de la vie, qui en découle, peut sembler quelque peu suspecte.

Une variante de ce scénario consiste à imaginer que la phase de colonisation interstellaire n'est qu'un épisode très court dans l'Histoire d'une civilisation : cela signifie que celle-ci décide de cesser son expansion après avoir colonisé un nombre extrêmement réduit de planètes. Dans ce cas, plusieurs civilisations ont pu naître avant nous dans la Voie Lactée, sans qu'aucune n'ait jamais réussi à atteindre la Terre.

Cela signifie que l'Humanité ne chercherait guère à coloniser beaucoup de planètes elle non plus : il suffirait alors d'arrêter la lecture du deuxième scénario en l'an 4000... Ce n'est pas très porteur pour un auteur de science-fiction, puisque cela ne met en jeu qu'un début de colonisation galactique avortée, de la part d'une Humanité définitivement solitaire ! De plus, qu'est-ce qui pourrait justifier un abandon aussi précoce de la politique de colonisation d'une civilisation ?

Le premier scénario, qui met en place un Superamas de la Vierge grouillant de civilisations en interaction, a lui aussi ses faiblesses. La principale est la notion de « pont quantique », qui est bien sûr une pure invention... Certes le manque de connaissances actuelles au sujet des très petites échelles et des très grandes densités d'énergie autorise à imaginer les découvertes scientifiques les plus « folkloriques » dans ce domaine. Mais l'idée de pouvoir un jour s'affranchir de la limitation de la vitesse de la lumière est plus une « pirouette » d'auteur de science-fiction qu'une véritable opportunité offerte par la science aujourd'hui : il n'est pas du tout certain qu'une « porte » reliant deux points de l'Univers puisse être un jour physiquement envisageable...

Imaginons donc un superamas de galaxies riche en civilisations,

mais dénué de ponts quantiques : à quoi pourrait-il ressembler ? Si les civilisations ont une durée d'expansion modérée (de l'ordre de la dizaine de milliers d'années), alors elles ne peuvent coloniser des planètes qu'à l'intérieur de bulles de taille réduite au sein de la galaxie. Nous retrouvons la vision d'un Univers constitué de « civilisations-bulles », qui peuvent éventuellement s'interpénétrer.

À l'inverse, si les civilisations ont une durée d'expansion plus longue (de l'ordre de la centaine de milliers d'années), alors nous pouvons imaginer une galaxie où s'entremêleraient plusieurs races différentes. Cela signifie que depuis des centaines de millions d'années, les races extraterrestres qui se seraient succédé auraient largement eu le temps de conquérir tous les systèmes planétaires potentiellement habitables à l'heure actuelle. Au moment de sa propre expansion, l'Humanité, comme les autres civilisations émergentes, se retrouverait face à une galaxie déjà pleine, et donc contrainte de rester sur Terre. En l'absence de pont quantique, elle ne pourrait même pas partir à la conquête des nouveaux systèmes planétaires qui naissent régulièrement dans la galaxie, car ceux-ci se trouvent à des distances bien trop lointaines de la Terre. Dans une telle galaxie, les vieilles civilisations ne laisseraient plus aucune place aux nouvelles venues et les « asphyxieraient » sur leur planète originelle.

Les Terriens n'auraient plus qu'à envahir des planètes anciennement colonisées par d'autres civilisations. Mais il faudrait pour cela que les formes de vie soient « compatibles », c'est-à-dire que les Terriens puissent subsister à long terme sur une planète abritant un écosystème d'origine extraterrestre. Or si c'était le cas, la Terre aurait été colonisée depuis longtemps : souvenez-vous que dans ce scénario, la galaxie grouille de civilisations mêlées, actuelles et passées...

En d'autres termes, toute expansion des Terriens paraîtrait

irrémédiablement bloquée, à l'instar des autres civilisations émergentes. Il s'agit d'un scénario tout à fait envisageable, mais particulièrement triste : il ne fait guère rêver l'amateur de science-fiction, puisqu'il rejette l'Humanité au rang de vilain petit canard confiné sur sa planète, qui finira tôt ou tard par s'autodétruire d'une manière ou d'une autre...

Conclusion

Il est temps de mettre un terme à ces visions d'avenir pour revenir dans le présent : sommes-nous seuls dans la galaxie ? Personne n'est en mesure de répondre formellement à cette question, car la réponse dépend de certaines données hors de nos connaissances actuelles. Les processus d'émergence de la vie comme les possibilités de voyage interstellaire habité restent enveloppés d'un flou considérable aujourd'hui ; ils pilotent pourtant l'état actuel de la population de l'Univers, tout comme le futur de l'Humanité.

Le but de ce livre était de fixer un cadre de réflexion en montrant que tout n'est pas permis pour autant : le lecteur pourra imaginer ses propres scénarios d'avenir à son gré, mais à condition de respecter certaines observations actuelles, qui sont somme toute assez contraignantes. Le paradoxe de Fermi n'est pas la moindre de ces contraintes, et c'est lui qui tend à affaiblir la plupart des scénarios envisageables. Ou bien il faut admettre que la vie est d'une rareté vraiment surprenante, au vu du nombre de systèmes planétaires permettant son développement, ou bien il faut admettre que les extraterrestres ont toujours eu un désintérêt surprenant pour la planète Terre, et continuent d'être étrangement discrets encore aujourd'hui...

À ce jour, le choix entre l'une ou l'autre de ces deux grandes « hypothèses » relève plus de la croyance que de l'analyse... L'impossibilité de s'imaginer l'évolution d'une civilisation à l'échelle du million d'années, même dans les grandes lignes, rend ces visions d'avenir encore plus difficiles.

Pourtant, à la lecture de ce livre, le lecteur se sera peut-être forgé sa propre conviction. Aura-t-il tort ou raison ? Il n'est pas

impossible que les prochaines décennies fournissent la réponse, que ce soit par le biais du programme SETI, ou par l'observation plus approfondie des exoplanètes.

En attendant, quelle belle source de rêve la Nature nous donne-t-elle ! Quel puissant mystère caché parmi les astres ! Un mystère que les Hommes finiront peu à peu par résoudre... dans un avenir que tout le monde espère aussi proche que possible.

Index

ADN, [20](#)
Alpha du Centaure, [76](#)
année-lumière, [67](#)
antimatière, [81](#)
ARN, [17](#)
astéroïdes, [57](#)
atome, [10](#)
bactérie, [3](#), [27](#)
Big Bang, [34](#)
Cambrien, [31](#)
ceinture d'astéroïdes, [49](#)
cellule, [18](#), [24](#)
cerveau, [8](#)
chromosomes, [22](#)
comète, [58](#)
conscience, [6](#)
Dædalus, [92](#)
deutérium, [82](#)
dioxygène, [26](#)
dioxygène, [53](#)
disques protoplanétaires, [75](#)
Drake, [80](#)
eau, [16](#)
éclairs, [56](#)

effet de serre, [48](#)
élément, [11](#)
étoile, [37](#)
étoile binaire, [74](#)
être vivant, [2](#)
excentricité, [71](#)
exoplanètes, [45](#), [66](#)
Fermi (paradoxe), [85](#)
fumeurs noirs, [52](#)
Gaïa, [4](#)
galaxie, [35](#)
géante gazeuse, [40](#)
gènes, [21](#)
intelligence, [7](#)
interférométrie, [91](#)
Lune, [79](#)
marée, [41](#), [55](#)
Mars, [47](#), [89](#)
Mercure, [72](#)
métallicité, [69](#)
MHD, [95](#)
migration, [44](#)
Miller (expérience), [23](#)
mitochondrie, [29](#)
molécule, [13](#)
naine brune, [42](#), [50](#)
naine rouge, [39](#)
neurone, [9](#)
ondes électromagnétiques, [63](#)

organique
matière, [12](#)
OVNIS, [88](#)
oxydant/réducteur, [30](#)
ozone, [33](#)
panspermie, [5](#), [25](#)
paradoxe de Fermi, [84](#)
photosynthèse, [54](#)
planète chtonienne, [46](#)
planète naine, [59](#)
planète océan, [73](#)
planète tellurique, [43](#)
procaryotes/eucaryotes, [28](#)
protozoaires/métazoaires, [32](#)
Proxima du Centaure, [77](#)
radioactivité, [51](#)
rayons cosmiques, [64](#)
réaction chimique, [14](#)
SETI, [90](#)
superamas de la Vierge, [94](#)
supernova, [38](#)
tableau périodique des éléments, [15](#)
terraformation, [96](#)
théorie des cordes, [93](#)
trous noirs, [65](#), [83](#)
ultraviolets, [61](#)
unité astronomique, [68](#)
univers observable, [87](#)
vent solaire, [62](#)

Vénus, [70](#)

vie, [1](#)

virus, [19](#)

Voie Lactée, [36](#), [78](#)

volcanisme, [60](#)