

Atelier Projet CIES – Cité de l'Espece

La Vie Extraterrestre

Note d'intention pour exposition

ECHES Olivier

Doctorant et Moniteur en traitement du signal

GUILLERM Romaric

Doctorant en ingénierie système - Moniteur en informatique

PASSOT Fanny

Doctorante en génétique moléculaire bactérienne - Monitrice en génétique

VIDEAU Sylvain

Doctorant et Moniteur en intelligence artificielle et systèmes multi-agents



2009

Sommaire

1.	Introduction.....	8
1.1.	Qu'est ce que la Vie ?	8
1.2.	La Vie sur Terre.....	8
2.	Des traces de vie.....	9
2.1.	Que nous apprend la vie sur Terre ?	9
2.1.1.	La vie dans des conditions inhospitalières	9
2.1.1.1.	Des eaux acides dans des régions volcaniques	10
2.1.1.1.1.	Des biofilms dans un torrent de montagne hyper acide	10
2.1.1.1.2.	Une communauté microbienne dans des eaux hydrothermales acides	10
2.1.1.1.3.	Une rivière rouge, analogue de Mars	11
2.1.1.2.	Des eaux fortement alcalines	11
2.1.1.2.1.	Un ressort vert dans un lac sodé en Egypte.....	11
2.1.1.2.2.	Des "pierres microbiennes" géantes dans un lac alcalin en turquie	11
2.1.1.3.	Des sources hypersalines.....	12
2.1.1.4.	Des terrains glacés.....	12
2.1.1.4.1.	Une biomasse importante dans les sols des Vallées Sèches en Antarctique	12
2.1.1.4.2.	Le permafrost : un lieu de diversité microbienne.....	12
2.1.1.4.3.	La glace marine antarctique : un lieu de vie	13
2.1.1.4.4.	Un lac sous les glaciers antarctiques	13
2.1.1.5.	Des cheminées hydrothermales au fond des océans.....	13
2.1.1.6.	Une source géothermale effervescente	14
2.1.1.7.	Des roches dans les profondeurs de la terre.....	14
2.1.1.7.1.	Loin sous le fond de l'océan.....	14
2.1.1.7.2.	Des sources géothermales à 200m dans le sol	14
2.1.1.8.	Une bactérie digne d'un scénario de science fiction.....	14
2.1.2.	Les conditions de l'apparition de la vie	15
2.1.2.1.	Les précurseurs de la vie	15
2.1.2.1.1.	L'atmosphère terrestre	15
2.1.2.1.2.	Les sources hydrothermales sous-marines.....	16
2.1.2.1.3.	Les météorites et les comètes	16
2.1.2.2.	L'organisation de la vie.....	16
2.2.	D'autres formes de vie possibles ?.....	17
2.2.1.	Des atomes différents	17
2.2.1.1.	Du silicium à la place du carbone	17
2.2.1.2.	De l'arsenic à la place du phosphate	18
2.2.2.	Des "briques" différentes	18
2.2.2.1.	Des bases azotées différentes	18
2.2.2.2.	Des acides aminés différents.....	18
2.2.3.	Un code différent	18

2.2.4.	Une vie dans un miroir	18
2.3.	Où chercher la vie dans le système solaire ?.....	19
2.3.1.	Mars.....	19
2.3.2.	Europe	19
2.3.3.	Titan.....	19
2.3.4.	Encelade	20
2.3.5.	Pourquoi écarter les autres planètes et satellites ?	20
2.3.5.1.	La Lune.....	20
2.3.5.2.	Venus.....	20
2.3.5.3.	Les géantes gazeuses.....	20
2.3.5.4.	Les comètes	20
2.4.	Où chercher la vie ailleurs dans l'univers ? Les exoplanètes	21
2.4.1.	Définition	21
2.4.1.1.	Générale : une exoplanète, qu'est ce que c'est ?	21
2.4.1.2.	Intérêt de l'étude des Exoplanètes.....	21
2.4.1.3.	Classification.....	21
2.4.1.3.1.	Exoplanète de type « Tellurique »	21
2.4.1.3.2.	Les « Super-Terre »	21
2.4.1.3.3.	Autres types d'exoplanètes	21
2.4.2.	Détection	22
2.4.2.1.	Méthodes actuelles	22
2.4.2.1.1.	Astrométrie (Astrometry)	22
2.4.2.1.2.	Méthode des vitesses radiales (Radial velocity)	22
2.4.2.1.3.	Chronométrage (Pulsar timing)	23
2.4.2.1.4.	Transit planétaire (Transit method).....	24
2.4.2.1.5.	Microlentilles gravitationnelles (Gravitational microlensing)	24
2.4.2.1.6.	Imagerie Directe (Direct imaging).....	25
2.4.2.2.	Autres méthodes	26
2.4.2.3.	Conclusion	26
2.4.3.	Quelques exoplanètes remarquables.....	27
2.4.3.1.	Upsilon Andromedae (1999)	27
2.4.3.2.	Mu Arae c (2004)	27
2.4.3.3.	HD 149026 b (2005).....	27
2.4.3.4.	TrES-4 (2006)	27
2.4.3.5.	Gliese 581 c (2007)	28
2.4.3.6.	HD 189733 b (2008).....	28
2.4.3.7.	Fomalhaut b (2008)	28
2.4.3.8.	COROT-Exo-7b (2009).....	28
2.5.	A la recherche de la vie	28
2.5.1.	Techniques de détection	28
2.5.1.1.	Structures macroscopiques et microscopiques.....	28
2.5.1.2.	Mise en culture.....	29
2.5.1.3.	Molécules organiques	29
2.5.1.4.	Rapports isotopiques du carbone	29
2.5.1.5.	Chiralité	29

2.5.2.	Les missions envoyées.....	30
2.5.2.1.	Vers Mars.....	30
2.5.2.2.	Vers les satellites des géantes gazeuses.....	30
2.5.2.3.	Vers les comètes.....	30
3.	Une vie extraterrestre intelligente ?.....	31
3.1.	Probabilité de rencontre et/ou d'existence	31
3.1.1.	Equation de Drake	31
3.1.2.	Le paradoxe de Fermi	31
3.2.	Phénomènes aérospatiaux expliqués et inexpliqués	32
3.2.1.	Les organismes d'études	32
3.2.2.	L'étude du GEIPAN : méthodologie et exemples de témoignages.....	33
3.3.	Recherche de signaux envoyés par des extraterrestres.....	34
3.3.1.	SETI : Généralités	34
3.3.1.1.	Radio SETI	34
3.3.1.2.	Optical SETI.....	35
3.3.2.	Les outils de détection.....	36
3.4.	Envoi de messages dans l'espace.....	36
3.4.1.	Objets physiques :	37
3.4.1.1.	La plaque d'Apollo 11 (1969).....	37
3.4.1.2.	Sonde Pioneer 10 (1972)	37
3.4.1.3.	Voyager 1 et 2 (1977)	38
3.4.1.4.	DVD « Vision of Mars » de la sonde Phoenix lander (sur mars le 25 mai 2008) ...	39
3.4.2.	Messages radiotélescopés.....	40
3.4.2.1.	Message d'Arecibo (16 novembre 1974)	40
3.4.2.2.	1 ^{er} message d'Evpatoria – projet « Cosmic Call » (1999)	41
3.4.2.3.	2 nd message d'Evpatoria : Interstellar Rosetta Stone (6 juillet 2003)	42
3.4.2.4.	Message Cosmic connexion (30 septembre 2006).....	42
Remerciements		44
Bibliographie.....		46
Exobiologie		46
Extrémophiles.....		46
Autres		47
Annexes		50
Liste de documents incontournables		50
Où est née la vie ?		50
L'exobiologie : de l'origine de la vie à la vie dans l'Univers.....		50
CNES : La vie ailleurs ?		50
Vie terrestre ! Vie extraterrestre ?.....		50
Groupement de recherche Exobiologie / Origine de la vie		50
Exobiology in the Solar System and the Search for Life on Mars.....		50
NASA : Astrobiology.....		50
The Astrobiology Web.....		50
Documents fournis		51

La Vie Extraterrestre

1. Introduction

Depuis l'Antiquité l'Homme se demande s'il existe une vie ailleurs dans l'Univers ou si notre planète est seule à abriter la vie. Avec l'essor de la biologie moléculaire au siècle dernier et la découverte de la complexité inouïe du vivant, l'idée s'est renforcée d'une vie "miraculeuse", issue d'une suite de hasards improbables. Mais les progrès en chimie et biochimie ont depuis permis de supposer que l'apparition de la vie ne s'est peut-être pas limitée à la Terre. Pourrait-on alors trouver un jour une vie extraterrestre ?

Citations utilisables (tirées de Brack 2008 et CNES 2006) :

- Epicure (300 av.JC) : "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".

- Lucrèce (Ier siècle av.JC) : "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 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."

- Antoine de Saint-Exupéry (Terre des Hommes, 1959) : "D'une lave en fusion, d'une pâte d'étoile, d'une cellule vivante germée par miracle nous sommes issus, et, peu à peu, nous nous sommes élevés jusqu'à écrire des cantates et à peser des voies lactées".

- Jacques Monod (Le Hasard et la nécessité, 1970) : "La vie est apparue sur la Terre : quelle était avant l'événement la probabilité qu'il en fut ainsi ? L'hypothèse n'est pas exclue, au contraire, par la structure actuelle de la biosphère, que l'événement décisif ne se soit produit qu'une seule fois. Ce qui signifierait que sa probabilité a priori était quasi nulle."

1.1. Qu'est ce que la Vie ?

Avant de se mettre à la recherche d'une vie extraterrestre, il faut savoir ce qu'on entend par "Vie". Qu'est-ce qui fait que quelque chose est vivant ? Ses sentiments ? Sa capacité à bouger ? Mais les plantes ne bougent pas, ne pensent pas ; et pourtant elles sont vivantes, personne n'en doute. Et les bactéries ? Ces organismes microscopiques constitués d'une seule cellule sont vivants aussi. Alors comment définir la vie ?

Les biologistes ne donnent pas tous exactement la même définition de la Vie, mais ils s'accordent sur deux propriétés fondamentales du vivant : l'auto-reproduction et l'évolution. L'auto-reproduction, c'est la capacité à produire une copie de soi-même. L'évolution vient de l'imperfection de la copie : la copie est légèrement différente de l'original, cette différence pouvant parfois permettre une meilleure adaptation à l'environnement, et donc un meilleur développement pour la copie que pour l'original. Ainsi, un organisme vivant est un système chimique capable de multiplier ses éléments pour produire une copie imparfaite de lui-même.

1.2. La Vie sur Terre

Serait-il possible de trouver une vie ailleurs que sur notre planète ? Pour répondre à cette question il faut trouver des bases solides sur lesquelles élaborer une réflexion. Quelles bases ? Le seul exemple de vie que nous connaissons aujourd'hui : la vie sur Terre.

Cette vie, en plus des capacités d'auto-reproduction et d'évolution, possède au niveau moléculaire des caractéristiques communes à tous les êtres vivants de la planète (figure 1).

Commençons par le "plan de montage et de fonctionnement" de chaque être vivant : l'information génétique. Cette information est portée par des molécules d'ADN (Acide DésoxyriboNucléique) qui utilisent toujours le même code formé à partir de quatre "lettres", les bases azotées A (Adénine), T (Thymine), G (Guanine) et C (Cytosine).

Cet ADN, ainsi que les autres composants de la cellule, est protégé à l'intérieur d'une membrane constituée de lipides qui sépare l'intérieur de l'extérieur de la cellule.

Une cellule vivante abrite toutes sortes de processus effectués par des "ouvriers", les protéines. Ces protéines sont toutes construites à partir des mêmes "briques", les acides aminés. Vingt acides aminés différents seulement sont utilisés dans les protéines. C'est la séquence de l'ADN (la suite des "lettres") qui indique quels acides aminés utiliser pour chaque protéine. Le code utilisé est le même pour tous les êtres vivants, des bactéries à l'Homme (figure 2).

Toutes ces molécules (ADN, lipides, protéines) ont un point commun : elles ont toutes un squelette d'atomes de carbone (figure 3). La vie sur Terre est basée sur ce qu'on appelle la chimie organique : la chimie des molécules carbonées. En dehors du carbone (C), les principaux éléments entrant en jeu sont l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N) par ordre d'importance.

Dans quelles conditions cette vie est-elle capable de se développer ? Comment est-elle apparue ? C'est en répondant à ces questions que l'on pourra avoir des éléments de réponse quant à la possibilité d'existence d'une vie ailleurs.

2. Des traces de vie

2.1. Que nous apprend la vie sur Terre ?

La seule vie que nous connaissons, c'est celle qui s'est développée sur notre planète. A partir de l'étude de cet exemple, que peut-on connaître d'une éventuelle vie ailleurs ? Principalement deux choses : les conditions extrêmes dans lesquelles une vie est capable de se multiplier, et les conditions nécessaires à son apparition.

2.1.1. La vie dans des conditions inhospitalières

Pour la plupart d'entre nous, nous sommes habitués à une vie dans des conditions que l'on considère clémentes et qui sont les conditions dans lesquelles nous vivons facilement : ni trop chaud, ni trop froid, pas (ou peu) de composés toxiques, de la lumière solaire, de l'oxygène. Dans ces conditions peut se mettre en place une chaîne alimentaire dont la base est occupée par les plantes. Par le phénomène de photosynthèse, ces plantes synthétisent la matière organique à partir des éléments minéraux et atmosphériques grâce à l'énergie fournie par la lumière du soleil.

C'est ce même phénomène de photosynthèse qui produit l'oxygène atmosphérique (dioxygène O_2) qui nous paraît essentiel à la vie parce qu'il l'est pour nous. Mais de nombreux organismes se passent de dioxygène qui est même un poison pour eux : il oxyde les molécules organiques qui se dégradent alors. A l'origine, l'oxygène atmosphérique était quasiment absent sur Terre, ce n'est qu'après l'apparition d'organismes photosynthétiques que la quantité de l'oxygène dans l'atmosphère est devenue aussi importante qu'aujourd'hui (figure 4). C'est grâce à cette abondance qu'une couche d'ozone (O_3) s'est formée dans la haute atmosphère, protégeant la surface de la planète des rayons ultraviolets.

L'oxygène n'est pas le seul paramètre pour lequel la vie se développe dans des conditions qui nous paraissent bien inhospitalières. On trouve sur notre planète des organismes vivants à plus de 100°C, ou au contraire dans la glace, des organismes capables d'utiliser des molécules toxiques ou de résister aux radiations. Des écosystèmes entiers sont basés sur des producteurs primaires de matière organique qui utilisent l'énergie chimique au lieu de l'énergie solaire. On trouve même des organismes vivants dans les roches. Chaque année sont découverts des êtres vivants dans des conditions toujours plus extraordinaires.

La plupart de ces survivants de l'impossible font partie de la grande famille des procaryotes, des organismes unicellulaires non compartimentés (à l'inverse des eucaryotes, comme nous, dont les cellules contiennent des compartiments spécialisés). Les procaryotes sont divisés en deux domaines : les bactéries (comme celles que l'on élimine avec des antibiotiques), et les archées (prononcer [arké]) dont on ne s'est aperçu que récemment qu'elles étaient aussi différentes des bactéries que des eucaryotes (figure 5).

Les différents exemples présentés ci-dessous montrent que la vie s'accommode très bien de conditions extrêmes pourvu qu'elle trouve de l'eau liquide (même en très faible quantité), quelques nutriments (qui peuvent être d'origine minérale ou gazeuse), et une source d'énergie (solaire ou chimique). Dans l'univers la condition la plus difficile à remplir parmi les trois est la présence d'eau liquide : la gamme de température et de pression à laquelle l'eau peut rester liquide est peu fréquente. C'est pourquoi on considère généralement que la principale condition pour la présence de vie est l'eau liquide.

Des valeurs repères pour le pH, la température et la salinité sont présentées figures 6 à 9.

Pour présenter les différents exemples, il pourrait y avoir un planisphère (ou un globe) sur lequel serait reportées par des repères les positions des différents exemples. Le visiteur cliquerait sur les repères pour afficher l'exemple correspondant.

2.1.1.1. Des eaux acides dans des régions volcaniques

Les eaux naturellement acides sur Terre sont assez rares et sont le plus souvent situées dans des régions volcaniques actives. Les autres cas d'eaux acides sont dus à l'activité humaine (rejets de drainage de mines, pluies acides).

2.1.1.1.1. Des biofilms dans un torrent de montagne hyper acide

La rivière Agrio en Argentine prend sa source sur les flancs du volcan Copahue (37°53'S, 71°02'W). L'eau y a un pH entre 1,6 et 1,8 et on y trouve des concentrations importantes de métaux (Aluminium, Fer, Silicium et Manganèse principalement). De fortes concentrations de chlore et de soufre achèvent de rendre cette rivière inhospitalière. Et pourtant, sur les roches du lit de ce torrent, on trouve des biofilms : des cellules vivantes incrustées dans un "mastic" qu'elles produisent. Ces biofilms sont formés par une association d'algues unicellulaires et de champignons filamenteux et abritent quelques bactéries (figure 10). Leur association leur permet de se protéger mutuellement et de profiter au mieux des ressources en nutriments. De plus leur "mastic", très dense et renforcé par des particules minérales, leur permet de résister au fort courant de ce torrent de montagne. (Baffico *et al.*, 2004)

2.1.1.1.2. Une communauté microbienne dans des eaux hydrothermales acides

White Island (Nouvelle Zélande, 37°31'26"S, 177°11'6"E) est une île volcanique de 3,5km² parcourue par un système hydrothermal. Des fumeroles et des sources parsèment le cratère. Les gaz volcaniques dissous dans l'eau des sources les rendent très acides (pH 2,5) et chargées en acides sulfurique et hydrochlorique, en fer et en aluminium. L'analyse d'un échantillon d'eau a révélé la présence de divers micro-organismes (figure 11), tous capables de se multiplier à des pH inférieurs à

2. Parmi ces organismes se trouvent non seulement des bactéries, mais aussi des algues unicellulaires (figure 12) dont une espèce en particulier s'est montrée capable de croître à pH 0,2. (Donachie *et al.*, 2002)

Cinq mois après les prélèvements, une éruption a fait exploser le cratère et recouvert la moitié de l'île de 30cm de cendres, prouvant le caractère instable de cet environnement.

2.1.1.1.3. Une rivière rouge, analogue de Mars

Le Rio Tinto, en Andalousie, est situé dans une zone riche en jarosite (un minéral formé à partir de sulfure de fer), composé qui a été trouvé sur Mars par le rover Opportunity dans la région El Capitan (Meridiani Planum). Cette similarité a amené à utiliser la région (le système hydrothermal de Jaroso) comme analogue terrestre de ces terrains martiens. Le Rio Tinto, pollué par des millénaires d'exploitation du fer par l'homme, a pris une teinte rouge qui lui donne son nom (figure 13). Ses eaux ont un pH qui varie entre 1,5 et 3,0, et sont chargées en fer et en soufre. Des micro-organismes se développent dans cet environnement et contribuent à la production de composés colorés. La rivière sert de zone de tests pour les instruments de détection de la vie dans ces conditions particulières. (Edwards *et al.*, 2007)

2.1.1.2. Des eaux fortement alcalines

Certains lacs dits lacs sodés (ou lacs de soude), naturellement très riches en soude, ont un pH basique (alcalin) qui peut être très élevé. La vie s'y développe pourtant.

2.1.1.2.1. Un ressort vert dans un lac sodé en Egypte

Le lac El Hamra, dans le désert Libyen au Nord-Est de l'Egypte, a un pH de 10 et une salinité de 16%. Dans cette eau se multiplient de nombreux micro-organismes. Parmi ceux-ci a été isolé en 2006 une bactérie à la morphologie surprenante. *Heliorestis convoluta* se présente sous la forme de "ressorts" de quelques microns de diamètre et quelques dizaines de microns de long (figures 14 et 15). Ces ressorts sont en fait des chaînes de bactéries, chaque bactérie individuelle ne formant pas beaucoup plus d'une spire du ressort. Pour utiliser au maximum les ressources carbonées, cette bactérie utilise l'énergie solaire grâce à une chlorophylle bactérienne qui donne une couleur verte aux cultures. *H.convoluta* présente aussi la particularité de ne se développer qu'à des pH de 8,5 à 10 et ne supporte même pas des pH neutres. (Asao *et al.*, 2006)

2.1.1.2.2. Des "pierres microbiennes" géantes dans un lac alcalin en Turquie

Les microbialites ("pierres microbiennes") sont des structures formées par la précipitation et/ou l'accrétion de particules minérales ou sédimentaires provoquée par des "tapis" bactériens. Le Lac Van (Turquie), le plus grand lac sodé sur Terre, abrite les plus grands microbialites connus, qui peuvent atteindre 40m de haut. Ils se forment au fond du lac, au dessus de points de sortie d'une eau souterraine riche en calcium et de pH neutre qui rencontre l'eau du lac pauvre en calcium et fortement basique (pH 9,7). Le mélange de ces deux masses d'eau provoque localement une forte précipitation de carbonate de calcium qui trouble l'eau. C'est là que des microbialites en forme de tours se forment. A l'extérieur de ces tours se trouvent des bactéries photosynthétiques, tandis que l'intérieur est recouvert de globules de carbonates incrustés dans un matériau riche en silice et en carbone organique (figures 16 et 17). La morphologie de ces globules rappelle étrangement des structures observées dans la météorite martienne ALH84001. (Lopez-Garcia *et al.*, 2005)

L'origine de ces globules n'est toujours pas bien comprise. Sont-ils formés par des processus chimiques, non biologiques ? Ou sont-ils formés par la présence des bactéries, directement sur celles-ci ou sur des composés qu'elles produisent ? Si cette dernière hypothèse est la bonne, cela voudrait dire que la météorite ALH84001 est peut-être porteuse des traces d'une vie martienne...

2.1.1.3. Des sources hypersalines

Le système des sources de East German Creek (52°45'N, 100°53'W) au Canada libère une eau chargée en sel provenant de dépôts souterrains d'une ancienne mer. Dans les alentours des sources se sont formés des bancs de sel cristallisés, témoins de la forte salinité de la zone (figure 18). L'eau des sources elle-même contient 6% de sel. La terre émet une odeur de sulfure d'hydrogène (odeur "d'œuf pourri" caractéristique). Dans les sources et dans les ruisseaux qui s'en échappent, on peut observer des "tapis microbiens" de quelques centimètres d'épaisseur flottant à la surface et de quelques millimètres d'épaisseur sur le fond. L'étude de ces communautés, composées en grande partie d'algues unicellulaires (eucaryotes), révèle une grande diversité d'organismes procaryotes de morphologies différentes (figure 19). Parmi ces procaryotes se trouvent de nombreuses bactéries capables d'utiliser l'énergie solaire grâce à des chlorophylles bactériennes. Une analyse plus poussée montre que ces bactéries supportent des gammes de pH assez larges (7 à 12 pour les plus étendues), ainsi que des taux de salinité bien plus élevés que ceux des sources, jusqu'à 26% de sel. (Csotonyi *et al.*, 2008)

2.1.1.4. Des terrains glacés

Sur Terre l'eau n'est pas toujours liquide : banquise, glaciers, glaces polaires, permafrost. Dans ces endroits où la glace prédomine, on pensait encore récemment que rien ne se développait et que les organismes qu'on y trouvait étaient "endormis", conservés par la glace mais totalement inactifs. Depuis quelques années cependant, les progrès des techniques de détection ont permis de montrer qu'il existe une vie active abondante dans ces zones.

2.1.1.4.1. Une biomasse importante dans les sols des Vallées Sèches en Antarctique

Les Vallées Sèches en Antarctique, terrains de simulation pour les expéditions vers la Lune et Mars, sont considérées comme l'environnement aride le plus difficile sur Terre (figure 20). Ces terrains dénudés balayés par de forts vents secs sont particulièrement inhospitaliers pour la vie : aridité extrême (moins de 0,3% de masse d'eau dans le sol), forte salinité des sols, radiations solaires importantes (le trou de la couche d'ozone est au dessus), et de grandes variations de températures (bien que restant très basses). Jusqu'en 2002 ces régions étaient considérées très pauvres en population microbienne. Mais une étude menée avec des moyens plus performants a démontré que les sols des Vallées Sèches antarctiques ne présentaient que dix fois moins de micro-organismes que des sols plus humides et/ou enrichis par les déjections d'oiseaux. (Cowan *et al.*, 2002)

2.1.1.4.2. Le permafrost : un lieu de diversité microbienne

Le permafrost, défini comme un sol qui reste sous 0°C pendant au moins deux ans, représente 26% des écosystèmes du sol et peut s'étendre jusqu'à 1km d'épaisseur. La température peut y atteindre quasiment -30°C. L'eau y est présente principalement sous forme de glace, mais pas uniquement. Localement, la présence de particules minérales perturbe la structure cristalline de la glace et permet à de minces pellicules d'eau de quelques nanomètres d'épaisseur de se former, l'épaisseur diminuant avec la température. Des poches d'eau salée, restes d'un ancien océan, permettent à de l'eau liquide de subsister à des températures négatives. En effet la présence de sel dans l'eau permet d'abaisser la température de solidification de l'eau, mais ces poches sont très concentrées en sels (14~30%). Malgré ces contraintes, on trouve dans le permafrost une grande diversité de micro-organismes : levures, champignons, bactéries variées. (Steven *et al.*, 2006)

Récemment l'intérêt des recherches sur la vie dans ces conditions a été renforcé par la présence probable de permafrost sur Mars.

2.1.1.4.3. La glace marine antarctique : un lieu de vie

La glace marine se forme en hiver principalement dans les régions polaires et peut recouvrir jusqu'à 13% de la surface terrestre. La plus grande surface de glace marine se forme dans l'océan Antarctique sur 20 millions de km². Lorsque l'eau de mer gèle, des cristaux d'eau pure se forment et excluent le sel et les particules solides. La glace d'eau de mer ainsi formée est constituée de glace d'eau pure parcourue d'un réseau de "canaux" d'eau hyper salée (tout le sel se retrouve concentré dans un faible volume d'eau) dans lesquels sont présents un grand nombre de micro-organismes variés, pris au piège lors de la solidification (figure 21). La vie dans ces canaux de glace, bien que protégée des prédateurs, est loin d'être facile. La température atteint facilement -20°C et la concentration en sel est trois fois plus importante que dans l'eau de mer. De plus l'activité de tous les organismes concentrés dans ces canaux provoque rapidement un manque de nutriments et une augmentation du pH jusqu'à 11. La présence d'organismes photosynthétiques fait aussi augmenter les quantités d'oxygène, induisant alors la formation de composés hyper réactifs qui détériorent les molécules organiques. Et pourtant la multiplication de tous ces organismes est telle que de nombreux animaux marins viennent profiter de l'abondance de nourriture libérée lors de la fonte des glaces (figure 22). (Thomas et Dieckmann, 2002)

2.1.1.4.4. Un lac sous les glaciers antarctiques

Le lac Vostok, en Antarctique (77°S, 105°E), profond de plus de 1200m, couvre environ 15 700km². Il est recouvert par 4km d'épaisseur de glacier, ce qui crée une pression importante permettant à l'eau de rester liquide à -2,5°C. Cette situation le rend similaire à ce qu'on suppose de la structure d'Europe, satellite de Jupiter. En 2004 un forage de 3600m dans le glacier qui recouvre le lac a permis d'accéder à la glace formée par le regel du lac. Une analyse critique des micro-organismes trouvés dans ce forage a permis d'éliminer des résultats les inévitables contaminations lors du forage. Les scientifiques ont alors eu la surprise de découvrir que les bactéries contenues dans la glace de regel du lac Vostok étaient similaires à des bactéries découvertes dans des sources chaudes, comme le geyser de Yellowstone (USA). Comment ces bactéries, qui vivent normalement à 50~95°C peuvent-elles se trouver dans un lac glacé dépourvu de sources hydrothermales ? Leur habitat ne serait en fait pas le lac lui-même mais des failles actives au fond du lac, profondes de plusieurs kilomètres au fond desquelles la température augmente grâce à la chaleur interne de la Terre. Lors de séismes, les failles actives éjectent dans le lac l'eau qu'elles contiennent et les bactéries qui y vivent. Les bactéries se retrouvent ensuite piégées dans la glace de regel à la surface du lac. (Bulat *et al.* 2004)

2.1.1.5. Des cheminées hydrothermales au fond des océans

Au fond des océans se trouvent des sources chaudes qui expulsent dans les eaux océaniques des panaches d'eau surchauffée et chargée de gaz. La forte pression due à la profondeur permet à l'eau de rester liquide à des températures dépassant amplement les 100°C. C'est là, dans un milieu totalement coupé du soleil, que l'on trouve les organismes vivant aux plus hautes températures. Ils utilisent une énergie chimique et se nourrissent de composés formés dans les fluides hydrothermaux sous l'effet de la température et de la pression.

Le champion de la vie à haute température fait partie de ces organismes : *Pyrolobus fumarii* ("le lobe de feu de la cheminée"). Il a été découvert sur les flancs d'un "fumeur noir" de la dorsale atlantique (26°N, 45°W) par 3650m de fond. De forme sphérique irrégulière (figure 23), cette archée se multiplie à des températures allant de 90°C à 113°C, sa température préférée étant 106°C. Elle supporte des pH de 4 à 6,5 et se porte aussi bien à une pression normale (300kPa) qu'à 25000kPa. Tout ce dont cet organisme aurait besoin pour vivre sur une autre planète, c'est de l'eau et un volcanisme actif. (Blöchl *et al.*, 1997)

2.1.1.6. Une source géothermale effervescente

La région géothermale de Waiotapu s'étale sur 18 km² sur l'île Nord de Nouvelle Zélande. Elle abrite une source chaude de 65m de diamètre et 150m de fond, le bassin de Champagne (figure 24). Il doit son nom à son effervescence, causée par de grandes quantités de gaz (dioxyde de carbone CO₂, azote N₂, méthane CH₄, hydrogène H₂, sulfure d'hydrogène H₂S) qui assurent ainsi le brassage de l'eau et maintiennent une température homogène de 75°C et un pH de 5,5. En plus de ces gaz, l'eau contient de grandes quantités de silices et de complexes metalloïdes-sulfides (sulfure d'arsenic As₂S₃, sulfure d'antimoine Sb₂S₃ et sulfure de thallium Tl₂S) qui forment des dépôts sur les bords du bassin. Dans ces eaux regorgeant de composés toxiques, on trouve de nombreux micro-organismes (bien que moins que dans d'autres sources chaudes de Nouvelle Zélande). Une étude a ainsi mis en évidence en 2007 une vingtaine d'espèces différentes de bactéries et autant d'archées, de morphologies plus ou moins habituelles. Toutes ces espèces, en plus de leur capacité à vivre à haute température, sont capables de supporter, voire d'utiliser, les composés souffrés sur-abondants et résistent à des quantités importantes de composés dérivés de l'arsenic ou de l'antimoine. (Hetzer *et al.*, 2007)

2.1.1.7. Des roches dans les profondeurs de la terre

Avec les progrès des techniques de forage l'Homme a exploré les profondeurs de la Terre. Et il est rapidement devenu évident que les bactéries et archées nous y avait précédé depuis longtemps. Des écosystèmes entiers sont enfouis dans les roches du sous-sol terrestre, dans des zones où la chaleur interne de la Terre se fait sentir. Cette vie dans le sous-sol profond de notre planète, totalement indépendante des conditions de la surface, pourrait tout à fait avoir des cousines dans le sous-sol profond d'autres planètes à cœur chaud.

2.1.1.7.1. Loin sous le fond de l'océan

Ainsi, en 2008, une équipe a analysé un forage océanique profond. Réalisé au large de Terre-Neuve (45°24'N, 44°47'W) par 2900m de fond, le forage s'est enfoncé jusqu'à 1600m sous le plancher océanique (soit un total de 4,5km sous la surface de la mer) jusqu'à des sédiments de 111 millions d'années. La température à cette profondeur est estimée entre 60°C et 100°C, et les seules sources de carbone sont des gaz piégés dans les roches (le méthane, CH₄, y est très présent). Dans ce milieu vivent des archées qui utilisent le méthane et l'hydrogène pour leur croissance et supportent très bien les hautes températures (figure 25). (Roussel *et al.*, 2008)

2.1.1.7.2. Des sources géothermales à 200m dans le sol

Les sources chaudes de Lidy dans l'Idaho sont une série de sources dont l'eau provient d'un réseau de failles profondes où la température atteint 58°C. Les roches du sous-sol de cette région, d'origine volcanique, sont privées d'apport extérieur en carbone organique. Dans les profondeurs de ces sources, des micro-organismes ont été trouvés, principalement des archées. Les analyses ont révélés que les archées de ces sources chaudes sont capables de produire du méthane à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène produit dans le sous-sol par géothermie. Ce méthane est ensuite utilisé dans les réactions de synthèse des molécules organiques. Ce type d'organisme ressemble à ce qui pourrait exister dans le sous-sol de certaines planètes (voir 2.3). (Chapelle *et al.*, 2002)

2.1.1.8. Une bactérie digne d'un scénario de science fiction

Contrairement à une croyance populaire, les cafards ne survivraient pas beaucoup mieux que les Hommes à une guerre nucléaire. Par contre *Deinococcus radiodurans*, une bactérie de 1,5 à 3,5 microns de diamètre, ne serait probablement pas affectée. Cette star de la résistance aux radiations s'est faite remarquer dès sa découverte en 1956 : elle prospérait dans des boîtes de conserves irradiées aux rayons gamma pour leur stérilisation.

Depuis, les nombreuses études qui ont été faites ont démontré que cette bactérie supporte sans aucun problème des doses d'irradiation de 5 000 Gray (Gy) et peut se remettre de doses allant jusqu'à 20 000 Gy (une dose de 10 Gy est mortelle pour l'homme). Sachant que les niveaux d'irradiation sur Terre dépassent rarement 0,2 Gy par an, certains ont émis l'hypothèse que *D. radiodurans* viendrait de Mars (où les taux de radiations sont bien plus élevés), via une météorite. Cependant, d'un point de vue génétique et biochimique, cette bactérie est tout à fait similaire aux autres bactéries terrestres. Son incroyable résistance aux radiations semble en fait être un effet secondaire d'une autre propriété de cette bactérie : sa résistance à la dessiccation (déshydratation totale). En effet, *D. radiodurans* survit sans encombre à plusieurs semaines de dessiccation en laboratoire, là où d'autres bactéries ne résistent même pas quelques jours. En quoi les résistances à la dessiccation et aux radiations sont-elles liées ? La dessiccation, comme les radiations, induit des dommages à l'ADN qui sont de même type dans les deux cas, de sorte que les mécanismes de réparation de l'ADN utilisés pour la résistance à la dessiccation confèrent aussi la résistance aux radiations. Ce sont aussi ces mêmes mécanismes qui permettent à la bactérie de supporter la présence d'eau oxygénée et les rayons UV.

D. radiodurans, capable de se multiplier à des températures allant de 4°C à 45°C et survivant aux températures négatives, se retrouve sur toute la planète : environnements riches (sols, déjections animales, viandes cuisinées) comme pauvres (granit d'une Vallée Sèche antarctique, poussières, instruments médicaux irradiés). Ses incroyables capacités de survie (qui l'ont fait rentrer dans le livre Guinness des records) lui permettraient même probablement de survivre sur Mars. (Battista, 1997 ; White *et al.*, 1999)

2.1.2. Les conditions de l'apparition de la vie

S'il apparaît aujourd'hui qu'une vie existante peut s'adapter à des conditions extrêmes, il n'en est pas de même pour son apparition. Le passage de la matière inerte à la vie reste encore totalement mystérieux, mais les travaux des scientifiques au cours des dernières décennies permettent d'émettre des hypothèses sur les conditions de ce passage.

2.1.2.1. Les précurseurs de la vie

Pour que la vie puisse apparaître, des molécules organiques simples, dites molécules prébiotiques, sont nécessaires. Ce sont les mêmes molécules qui sont la base du vivant aujourd'hui : les acides aminés (constituants des protéines), les lipides (constituants des membranes) et les bases azotées (constituants de l'ADN). Ces molécules se forment spontanément dans certaines conditions à partir de molécules encore plus simples : monoxyde et dioxyde de carbone (CO et CO₂), méthane (CH₄), hydrogène (H₂) et ammoniac (NH₃). Plusieurs sources de molécules prébiotiques sont possibles : l'atmosphère terrestre, les cheminées hydrothermales dans les océans et les météorites.

2.1.2.1.1. L'atmosphère terrestre

Les molécules très simples à la base des molécules prébiotiques sont gazeuses et étaient présentes dans l'atmosphère primitive. Dans cette atmosphère, les rayonnements UV non filtrés par la couche d'ozone (alors absente) et les éclairs ont pu déclencher des réactions menant à des précurseurs de vie. En 1953 Miller réalisa une expérience dans laquelle un mélange gazeux (CH₄, H₂, NH₃, H₂O) est soumis à des décharges électriques. Il obtint ainsi quelques acides aminés et des molécules permettant la synthèse d'autres précurseurs de vie. Cependant les scientifiques pensent aujourd'hui que l'atmosphère primitive n'était pas dominée par le méthane comme le pensait Miller, mais par le CO₂. Dans ces conditions, la formation de molécules prébiotiques est beaucoup plus difficile.

Cette source de précurseurs de vie a pu cependant être présente sur d'autres corps célestes, tel Titan, le plus gros satellite de Saturne dont l'atmosphère comporte de grandes quantités de méthane.

2.1.2.1.2. Les sources hydrothermales sous-marines

L'eau qui s'échappe des sources hydrothermales dans les dorsales océaniques est chargée en gaz : hydrogène (H₂), azote (N₂), oxydes de carbone (CO, CO₂), méthane (CH₄), dioxyde de soufre (SO₂), sulfure d'hydrogène (H₂S). Tous ces gaz, chauffés par l'eau jusqu'à 350°C et sous la pression qui règne à ces profondeurs, peuvent réagir entre eux pour former des molécules prébiotiques. De plus les cheminées hydrothermales sont protégées par l'épaisse couche d'eau océanique des radiations UV et des bombardements météoritiques, intenses aux débuts de l'histoire de la planète.

Pour que de tels précurseurs se forment sur une autre planète il faut que celle-ci comporte un océan et un volcanisme actif, comme c'est peut-être le cas sous une épaisse couche de glace sur Europe, le plus petit satellite de Jupiter, ou sur Encelade, un satellite de Saturne.

2.1.2.1.3. Les météorites et les comètes

Des molécules organiques se forment dans les milieux interplanétaires et interstellaires. Ces molécules ont pu échouer sur notre planète grâce aux nombreuses météorites (et peut-être comètes) qui ont bombardé la Terre. L'analyse des météorites carbonées montre qu'elles contiennent de nombreux acides aminés (dont certains des 20 acides aminés protéiques), des bases azotées, des acides carboxyliques (dont certains sont des constituants membranaires) et d'autres molécules organiques utiles à la vie. La catégorie de météorites la plus abondante en masse est celle des micrométéorites ; ces particules de 50 à 500 microns représentent 99% de la matière spatiale qui arrive sur Terre. Encore aujourd'hui 50 à 100 tonnes en arrivent sur Terre chaque jour, et lors du bombardement météoritique intense qu'a connu notre planète il y a 4,1 à 3,9 milliards d'année il en arrivait 1 000 fois plus. La quantité de carbone ainsi apportée à la Terre représente 25 000 fois la quantité de carbone actuellement contenue dans les êtres vivants.

Cette source de molécules prébiotiques a probablement ensemencé tous les corps du système solaire sans distinction.

2.1.2.2. L'organisation de la vie

Si la formation de molécules prébiotiques semble simple et très répandue dans l'univers (on en trouve même dans les nuages interstellaires), il n'en est pas de même pour l'apparition de la vie elle-même. Comment, à partir de molécules prébiotiques, parvenir à la vie telle que nous la connaissons ? Il est hautement improbable qu'une cellule se soit auto-organisée directement à partir de ces molécules. Quelles étapes intermédiaires ont-elles été nécessaires, et dans quelles conditions ?

Faute de pouvoir voyager dans le temps ou d'avoir réussi à recréer la vie en laboratoire, il nous faut chercher des indices dans les traces qu'a pu laisser la vie primitive. Mais de nombreux facteurs contribuent à effacer ces traces : la géologie active de notre planète qui assure le renouvellement de l'écorce terrestre, le ruissellement des eaux qui érode les sols, et la vie elle-même, en particulier par la production d'oxygène qui altère de nombreuses molécules organiques. Les plus anciennes traces de vie probables dont nous disposons sont des sédiments âgés de 3,75 milliards d'années, découverts dans le sud-ouest du Groenland, mais ils ne consistent qu'en des traces de matière organique modifiée et ne permettent pas de définir quel être vivant en est l'origine. Leur présence suggère néanmoins que la vie était déjà bien développée sur Terre à cette période. Les scientifiques supposent qu'elle serait apparue il y a environ 4 milliards d'années, soit un peu plus d'un demi milliard d'années après la formation de la Terre. A cette période la Terre subissait un bombardement météoritique intense, susceptible de faire s'évaporer les océans primitifs suite à quelques impacts particulièrement violents. Les prémices de la vie devait donc probablement être assez robustes pour résister à ces impacts, voire redémarrer après les plus violents. Le temps court d'apparition et la robustesse suggèrent une certaine simplicité qui permet de supposer que ces prémices auraient pu apparaître ailleurs dans notre système solaire.

Ces maigres indications ne permettent aucune certitude sur les processus qui ont mené à la vie, mais ils permettent d'élaborer des hypothèses. Deux types de théorie ont principalement été élaborées : celle du réplicateur primordial et celle du métabolisme primordial.

Dans la première théorie certaines molécules prébiotiques s'assemblent en une chaîne capable de s'auto-répliquer. Il se produit parfois des erreurs de réplication, conduisant à des réplicateurs légèrement différents dont certains sont mieux adaptés au milieu environnant que leur prédécesseur. Puis il se développe autour de ces réplicateurs un métabolisme (ensemble des réactions chimiques au sein d'un organisme) et des compartiments : c'est la proto-cellule. Le point faible de cette théorie est l'apparition du réplicateur initial : aucune expérience n'a jamais permis d'obtenir de molécule capable de produire des copies d'elle-même sur plus de quelques "générations".

Dans la deuxième théorie un cycle de réactions chimiques se met en place dans un compartiment. L'abondance des composés chimiques ainsi produits leur permet de "déborder" de leur compartiment et d'envahir les compartiments voisins. Au fil du temps les cycles se complexifient, formant un métabolisme primordial, jusqu'à ce que le stockage d'information sur des chaînes moléculaires soit "inventé". Cette deuxième théorie suppose une transition graduelle de la matière chimique inerte à la vie et permet probablement des arrêts et re-démarrages du processus, les molécules impliquées dans les cycles chimiques étant plus simples, et donc plus résistantes, que les chaînes des réplicateurs.

Dans les deux cas la vie est apparue dans l'eau, molécule qui peut à la fois servir de réactif chimique et permettre la diffusion des molécules, et donc leur rencontre. Les minéraux ont probablement aussi joué un grand rôle. Ainsi certaines roches microporeuses forment des compartiments confinés dans lesquels peuvent se mettre en place des réactions chimiques. Certains minéraux ont aussi la propriété de "capter" des molécules organiques, les rapprochant ainsi et facilitant les réactions entre elles. Par ailleurs les ions métalliques peuvent servir de catalyseurs de réactions chimiques et sont encore aujourd'hui utilisés pour cela par de nombreuses enzymes.

2.2. D'autres formes de vie possibles ?

Au vu de la diversité des morphologies et des organisations des êtres vivants sur Terre, il apparaît clairement que la Nature a bien plus d'imagination que les Hommes. L'aspect d'éventuels extra-terrestres ne ressemblerait donc sûrement pas à ceux des organismes terriens, ni même à quoi que ce soit que nous ayons pu imaginer, quoi qu'aient inventé les nombreux écrivains et réalisateurs de science-fiction. Mais ces différences d'apparences ne sont pas les seules envisageables. Des différences plus fondamentales pourraient se situer au niveau moléculaire, et la chimie d'une vie extraterrestre pourrait ainsi être différente de la nôtre, tout en obéissant aux mêmes lois physico-chimiques.

2.2.1. Des atomes différents

Certains atomes ont des propriétés proches d'atomes utilisés par le vivant. Ainsi le silicium et l'arsenic ont une structure semblable respectivement au carbone et au phosphate.

2.2.1.1. Du silicium à la place du carbone

L'atome de carbone est capable d'établir des liaisons stables avec quatre atomes, et de former ainsi le squelette de molécules complexes. Le silicium possède aussi cette propriété géométrique. Il semble donc possible d'obtenir des molécules dont le squelette serait formé d'atomes de silicium mais dont la structure serait similaire à celle de molécules à squelette carboné. De telles molécules seraient stables à de plus hautes températures que les molécules carbonées et pourraient ainsi permettre de coloniser des milieux plus chauds (le sous-sol très profond par exemple). De plus le

silicium étant abondant dans les roches (il représente un quart de la masse de la croûte terrestre) sa quantité n'est pas limitante. Cependant, alors que la chimie du carbone semble quasiment universelle, de nombreuses molécules organiques carbonées ayant été trouvées dans les espaces interstellaires, ce n'est pas le cas de la chimie du silicium. Et bien que le silicium soit très abondant il n'a pas donné lieu à une chimie aussi riche que le carbone.

2.2.1.2. De l'arsenic à la place du phosphate

Si l'arsenic est aussi toxique pour la vie, c'est parce qu'il se comporte de manière similaire au phosphate. Ainsi il entre dans les réactions faisant normalement intervenir le phosphate et les bloque. Cette proximité laisse supposer qu'une vie utilisant l'arsenic à la place du phosphore est plausible, d'autant plus que le phosphore est un élément rare.

2.2.2. Des "briques" différentes

Si on se situe non plus au niveau des atomes mais au niveau des "briques du vivant", des différences apparaissent possibles sans altérer l'organisation générale du vivant.

2.2.2.1. Des bases azotées différentes

L'information génétique de la vie que nous connaissons est codée par les bases azotées de l'ADN. Nous n'utilisons que quatre bases (Adénine, Thymine, Guanine, Cytosine) pour notre ADN, mais ce ne sont pas les seules existantes. Une autre vie aurait donc pu opter pour un assortiment différent de bases azotées, ou pour des bases plus nombreuses

2.2.2.2. Des acides aminés différents

De manière similaire à ce que l'on observe pour l'ADN avec les bases azotées, nos protéines n'utilisent pas tous les acides aminés existants. On peut donc penser qu'une autre vie pourrait utiliser d'autres acides aminés que les vingt que contiennent nos protéines.

2.2.3. Un code différent

Le code génétique, qui indique quels acides aminés utiliser pour chaque protéine, est le même pour toute la vie que nous connaissons. Mais un autre code serait tout à fait possible, basé sur le même principe mais utilisant une clé de déchiffrement différente.

2.2.4. Une vie dans un miroir

Une grande partie des molécules organiques ne sont pas symétriques par rapport à elles-mêmes, leur image dans un miroir ne leur est pas superposable. Un peu comme nos mains : le reflet de notre main droite dans un miroir n'est pas superposable à notre main droite mais à notre main gauche. Les molécules qui ont cette propriété sont dites chirales (du grec *kheir*, la main). La chiralité des molécules organiques provient du carbone : cet atome peut former des liaisons avec quatre autres atomes. Lorsque ces quatre atomes (ou groupes d'atomes) sont différents l'assemblage est asymétrique. La molécule formée peut exister sous deux formes, qui sont chacune l'image de l'autre dans un miroir, un peu comme nos mains (figure 26), on appelle donc ces deux formes la forme droite et la forme gauche.

Les acides aminés (les "briques" des protéines) sont des molécules chirales. Les acides aminés utilisés par la vie que nous connaissons sont tous de forme gauche. Des études ont montré que des protéines construites avec un mélange d'acides aminés droits et gauches ne peuvent pas former de structure tridimensionnelle stable. Mais il paraît possible qu'une vie se développe qui utiliserait exclusivement des acides aminés droits, et dont les molécules seraient l'image dans un miroir des molécules utilisées par notre vie.

La notion de chiralité est assez facile à comprendre si les visiteurs peuvent manipuler des “maquettes” de molécules droites et gauches devant un miroir. Avec seulement un support texte, même avec des schémas, le concept est beaucoup plus ardu.

2.3. Où chercher la vie dans le système solaire ?

Quel que soit le corps du système solaire sur lequel la vie est recherchée, il paraît clair aujourd’hui qu’elle ne pourrait être que microscopique. Une vie plus évoluée (intelligente ?) ne semble pas crédible hors de la Terre dans les limites du système solaire. Pour trouver ce type de vie (si elle existe) il faudra aller plus loin, vers les exoplanètes.

2.3.1. Mars

Bien qu’on sache aujourd’hui qu’aucune vie intelligente, ni même végétale, n’habite Mars, la planète reste le premier endroit à explorer hors de notre planète pour rechercher la vie, ou tout au moins des traces de vie. Par le passé, il y a probablement eu de l’eau liquide sur Mars, qui a laissé sa trace sur la surface : ravines d’écoulement, roches sédimentaires typiques d’une formation en présence d’eau. De plus l’atmosphère était probablement plus épaisse et plus protectrice. Si ces conditions sont restées stables assez longtemps, la vie a peut-être pu y apparaître. Mais aujourd’hui l’atmosphère, ténue et composée à 95% de CO₂, ne protège plus des rayons UV et les températures varient de -100°C à 0°C. Dans ces conditions la vie aurait du mal à subsister en surface. Si une vie existe encore sur Mars, il faudra la chercher dans le sous-sol, à l’abri des rayonnements solaires et des composés oxydants trouvés en abondance sur le sol de Mars. Dans les profondeurs de la planète la chaleur interne pourrait permettre à une population microscopique de survivre, de manière similaire à ce que l’on trouve dans les profondeurs de la Terre. Même si la vie n’a pas survécu (si elle a existé un jour), la faible activité volcanique et tectonique de Mars en auront moins effacé les traces que sur Terre.

Ces dernières années, la découverte de la présence de méthane, un gaz peu stable, dans l’atmosphère a encore augmenté l’intérêt pour la planète rouge. Deux hypothèses sont possibles pour son renouvellement : hydrogéochimique ou biologique (figure 27). Dans la première hypothèse des sources hydrothermales dans des roches du sous-sol riches en eau pourraient produire du méthane à partir de l’eau et des roches ; ce méthane remonterait ensuite par des fissures jusqu’à la surface. Dans la deuxième hypothèse, des micro-organismes méthanogènes, similaires à ceux que l’on trouve dans le sous-sol de notre planète, produiraient du méthane dans les mêmes roches riches en eau que pour la première hypothèse.

2.3.2. Europe

Europe est le plus petit des quatre satellites galiléens de Jupiter. Sa surface est recouverte par une épaisse couche de glace remodelée en continu par du cryovolcanisme et/ou des phénomènes tectoniques. Les modèles de la structure interne proposent un océan d’eau liquide salée sous 10 kilomètres d’épaisseur de glace. La proximité du satellite avec sa planète engendre un phénomène de marée dans le cœur rocheux d’Europe, qui produit de la chaleur. Cette chaleur est peut-être suffisante pour induire une activité hydrothermale dans l’océan sous-glaciaire, créant des conditions propices à l’apparition de la vie. Si c’est le cas, le cryovolcanisme peut peut-être faire remonter à la surface des traces de cette vie sous la glace.

2.3.3. Titan

L’atmosphère de Titan, le plus grand satellite de Saturne, est très riche en méthane (CH₄) et comporte de nombreux composés organiques en aérosols qui masquent la surface. Cette composition singulière rend Titan très attractif pour la recherche de vie, ou de ses précurseurs. La température qui y règne (-180°C à la surface) rend impossible la présence d’eau liquide, mais permet

un cycle du méthane similaire au cycle de l'eau sur la Terre : nuages, pluies, rivières, lacs. L'eau est présente sous forme de glace et constitue probablement la surface de la planète, recouverte par des hydrocarbures dérivés du méthane. Ces derniers se forment dans la haute atmosphère, les rayons UV fournissant l'énergie d'une chimie organique très riche. Outre les hydrocarbures, les produits de cette chimie comprennent de nombreux composés susceptibles de conduire à des précurseurs de vie.

L'origine du méthane reste énigmatique. Cette molécule n'est normalement pas stable dans l'atmosphère, il faut donc qu'elle soit produite en continu. Deux hypothèses sont possibles : des sources hydrothermales produiraient du méthane à partir d'eau et de roches dans l'océan sous-glaciaire probable du satellite, ou bien des micro-organismes producteurs de méthane, similaires à ceux que l'on trouve dans le sous-sol terrien, produiraient du méthane à partir d'eau et de molécules carbonées. Mais les quantités produites sont peu compatibles avec une origine biologique.

2.3.4. Encelade

La mission Cassini/Huygens a révélé sur ce petit satellite de Saturne (500km de diamètre) un phénomène surprenant : La couche de glace qui le recouvre est marquée au pôle Sud de grande failles, dites "rayures du tigre" d'où s'échappent de gigantesques geysers de glace, d'eau et de molécules organiques. Ces geysers suggèrent que sous la couche de glace se cache de l'eau liquide sous pression, en contact avec le cœur rocheux du satellite. Comme pour Europe, la proximité de Saturne engendre un phénomène de marée dans le cœur rocheux qui pourrait assurer une chaleur suffisante pour une activité hydrothermale.

2.3.5. Pourquoi écarter les autres planètes et satellites ?

2.3.5.1. La Lune

Bien que la Lune contienne probablement de la glace d'eau à ses pôles, l'absence totale de chaleur interne et d'atmosphère en fait un corps glacé sur lequel l'eau liquide ne peut subsister.

2.3.5.2. Venus

Venus a peut-être ressemblé à la Terre dans son passé, permettant peut-être l'émergence de la vie. Mais aujourd'hui les conditions sur la planète sont trop hostiles pour supporter la vie : la température de surface est de 460°C et l'atmosphère est parcourue d'épais nuages d'acide sulfurique qui empêchent toute recherche de traces d'une vie primitive, et les ont peut-être même effacées si elles existent.

2.3.5.3. Les géantes gazeuses

Bien que l'atmosphère des planètes géantes gazeuses soit le siège de réactions de chimie organique, l'absence de surface limite l'apparition de la vie.

2.3.5.4. Les comètes

Bien que l'apparition de la vie sur les comètes soit tout à fait improbable, l'étude de leur composition pourrait aider à comprendre l'énigme de l'apparition de la vie sur Terre en permettant d'avoir accès à la chimie carbonée interplanétaire.

2.4. Où chercher la vie ailleurs dans l'univers ? Les exoplanètes

2.4.1. Définition

2.4.1.1. Générale : une exoplanète, qu'est ce que c'est ?

Une planète est dite exoplanète (ou planète extrasolaire) si elle orbite autour d'une étoile autre que le soleil. Cette définition englobe donc une large variété de planètes aux caractéristiques différentes, tant au niveau de leurs masses que de leurs compositions par exemple. Au 23 mars 2009, 344 exoplanètes ont été découvertes.

L'existence de telles planètes, bien que théoriquement prévue depuis longtemps, n'a pu être observée que depuis quelques années, avec en 1988 la première découverte publiée par [Campbell & al., 1988]. Cependant, les limites technologiques de l'époque n'ont permis la confirmation de cette découverte qu'en 2003. De ce fait, la découverte dite fondatrice est considérée comme étant celle de [Wolszczan & Frail, 1992], publiée dans Nature 4 ans plus tard, en 1992.

Depuis, de nombreuses exoplanètes sont découvertes chaque année, et le rythme tend à s'accroître de par l'amélioration des moyens techniques d'une part, et la création de nouvelles méthodes de détection d'autre part. Une présentation des caractéristiques des exoplanètes sera effectuée dans la partie suivante, avant de détailler les méthodes de détections utilisées, ainsi que leurs fonctionnements, pour finalement décrire quelques exoplanètes importantes, de par leurs caractéristiques physiques ou historiques.

2.4.1.2. Intérêt de l'étude des Exoplanètes

Parmi ces diverses planètes, certaines, regroupant des conditions particulières présentées dans le chapitre 2.1.2, pourraient abriter une vie extra-terrestre. D'autres cependant, possèdent des caractéristiques qui, bien que rendant impossible la présence d'une vie à leur surface, ont fait avancer les connaissances sur les différents types de planètes eux même.

2.4.1.3. Classification

2.4.1.3.1. Exoplanète de type « Tellurique »

Les exoplanètes de type tellurique sont logiquement recherchées lorsque l'on parle de vie extra-terrestre. En effet, contrairement aux planètes gazeuses, une planète tellurique possède une surface solide, qui permettrait à la vie de s'y développer. Cependant, de par sa faible masse, ce type de planète demeure difficile à détecter.

2.4.1.3.2. Les « Super-Terre »

Les super-terres sont un sous type des planètes telluriques, dont la masse, bien que supérieure à celle de la Terre, est inférieure à celle des géantes gazeuses. Cette appellation peut sembler trompeuse, dans le sens où une super-terre n'implique pas forcément les conditions de températures, d'atmosphère ou de pression nécessaire au développement de la vie, mais ne fait référence qu'à une plage de masse spécifique. Celle-ci est d'ailleurs source de débats, [Valencia et al., 2007] définissant une super-terre comme une planète tellurique d'une masse de 1 à 10 fois celle de la terre tandis que [Fortney et al., 2007] place cette fourchette de masse entre 5 et 10. Tout comme la famille générale des planètes telluriques, les super-terres sont les exoplanètes les plus à même de fournir les conditions nécessaires à l'apparition d'une vie extra-terrestre.

2.4.1.3.3. Autres types d'exoplanètes

Dans l'univers, les géantes gazeuses sont le type de planète le plus répandu, devant les planètes telluriques. Selon leur composition interne, plusieurs sous types sont distingués.

Bien que leur surface ne soit pas clairement définie, et donc, inhospitalière concernant le développement de la vie, la détection de telles planètes peut fournir des informations sur d'éventuelles formes de vie, non pas à la surface de la géante gazeuse, mais sur celle de ses éventuels satellites, à la surface desquels la vie pourrait s'être développée. A l'heure actuelle cependant, les observations de tels satellites sont encore hors de portée.

Il est à noter que, parmi les géantes gazeuses, les Jupiter chaud sont un nouveau sous type ayant été découvert lors des recherches d'exoplanète. Il est composé de planètes d'une masse proche ou supérieure à celle de Jupiter, mais possédant une orbite très proche de leur étoile. Ce type de planète est particulièrement bien détecté par la méthode des vitesses radiales, décrite dans le chapitre suivant.

2.4.2. Détection

2.4.2.1. Méthodes actuelles

La figure 28 représente les différentes méthodes de détections d'exoplanètes, selon leurs principes généraux, ainsi que leurs éventuelles évolutions pouvant être envisagées dans les prochaines années. Les branches principales de ces approches sont les suivantes.

2.4.2.1.1. Astrométrie (Astrometry)

L'astrométrie est la plus ancienne des méthodes utilisées pour la recherche d'exoplanètes, bien que son utilité et son étude soient apparues bien avant la recherche de telles planètes. Elle consiste à mesurer la position absolue d'une étoile, et peut également mesurer son mouvement lorsque celui-ci est vu de dessus/dessous (Dans le cas typique ou la méthode des vitesses radiales ne peut pas fournir d'information). Ainsi, lorsque le mouvement observé effectué par l'étoile est une ellipse régulière, ceci est probablement dû à la présence d'une exoplanète autour de cette même étoile (d'après le problème des 2 corps, et la mesure du barycentre définissant le centre commun de l'orbite de l'étoile et de sa planète). Bien que très ancienne (les premiers écrits sur le sujet datant de 190 avant J.C.), cette méthode n'a été utilisée avec succès dans l'étude des exoplanètes qu'à partir de 2002, lorsque Hubble a confirmé la précédente découverte de Gliese 876 b grâce à l'astrométrie. Pour l'instant, les équipements terrestres n'offrent pas une sensibilité suffisante afin de produire des mesures d'une précision convenable, réduisant l'intérêt de cette approche dans la détection pure d'exoplanètes. Cependant, l'astrométrie est particulièrement adaptée à la détection de planètes possédant des orbites importantes, ce qui la rend complémentaire avec les autres approches, beaucoup plus sensible à des orbites plus proches de leur étoile. L'inconvénient de cette spécificité est qu'elle requiert des temps d'observations d'autant plus long. En effet, la détection de planète grâce à l'astrométrie peut nécessiter des observations sur des années, voir des décennies, durée liée à la période d'une orbite d'une planète très éloignée de son étoile.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
Gleise 876 b	2002	Astrométrie	Mesure confirmant la présence de la planète, pas une découverte « nouvelle »

2.4.2.1.2. Méthode des vitesses radiales (Radial velocity)

La méthode des vitesses radiales (également appelée Doppler spectroscopy) est, parmi toutes les méthodes de détection d'exoplanètes, celle qui a fournie le plus grand nombre de résultats. Elle se base sur l'utilisation de l'effet « Doppler-Fizeau », qui est un phénomène physique bien connu,

responsable par exemple de la perception chez un observateur du changement du son produit par la sirène d'un véhicule selon que celui-ci s'approche, s'éloigne, ou ne se déplace pas.

Utiliser ce phénomène en astronomie et l'étudier à l'aide de spectrographes a été proposé en 1952 par Otto Struve [Struve, 1952], bien que la technologie de l'époque, en particulier la sensibilité des équipements, ne permettait pas d'envisager la détection d'exoplanètes. Aujourd'hui, des variations de vitesses de l'ordre du m/s peuvent être détectées. En pratique, le phénomène ici étudié, appliqué à l'astronomie, permet de mesurer la vitesse radiale d'un corps céleste, à partir des décalages des longueurs d'ondes apparaissant sur leurs spectres (Vers le rouge l'étoile s'éloigne, vers le bleu elle se rapproche). Une fois ces mesures effectuées, nous pouvons observer leurs variations. Si celles-ci sont périodiques, il est possible que ce soit dû à la présence d'une planète orbitant autour de l'étoile.

Une fois la série de données analysée, son étude permet également d'estimer la masse de la planète, grâce à l'amplitude des variations des vitesses radiales. Cependant, ce point est à nuancer par une des limites de cette méthode : en effet, elle est dépendante de la position spatiale entre l'étoile et la planète.

Dans la figure 29, le cas est idéal, à savoir que les mouvements de l'étoile et de la planète (en rouge) sont entièrement observés dans la ligne de vue de l'observateur. Ici, la méthode des vitesses radiales sera capable de détecter la présence de la planète en orbite et également d'estimer de manière précise sa masse.

Lorsque les orbites se retrouvent un peu plus « penchées », la détection de la planète reste possible, mais la masse de la planète sera sous évaluée. Enfin, le pire des cas est représenté sur la figure 30.

Ici, la méthode des vitesses radiales sera incapable de détecter la planète en orbite autour de l'étoile, les modifications de spectre de l'étoile ne pouvant être étudiée, celle-ci ne s'approchant et ne s'éloignant pas.

On constate donc que, de par son fonctionnement, cette méthode de détection est particulièrement adaptée au repérage de planètes massives et proches de leur étoile. Ainsi, elle a entre autres permis de détecter un nouveau type de planète appelé les « Jupiter chauds » en raison de leurs masses proches de celle de Jupiter, mais également de leur proximité de l'étoile, réduisant l'amplitude de leur orbite et augmentant la température de la planète. Enfin, bien qu'indépendante de la distance de l'étoile, cette méthode nécessite des mesures faiblement bruitées, ce qui rend son utilisation essentiellement possible dans des distances inférieures à 160 A/L.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
51 Pegasi b	1995	Vitesses Radiales	

2.4.2.1.3. Chronométrage (Pulsar timing)

La méthode de détection par pulsar est un cas à part dans la recherche d'exoplanète. En effet, elle permit en 1992 de découvrir la première exoplanète confirmée [Wolszczan & Frail, 1992], exoplanète en orbite autour, non pas d'une étoile, mais d'un pulsar. De ce fait, cette découverte est singulière car la présence de la planète fut révélée à l'aide de mesures concernant le pulsar, et non d'une technique développée pour la détection de planètes.

Un pulsar étant un reste d'étoile hyper dense, en rotation, et émettant des ondes radios d'une très grande régularité, l'étude des perturbations de ce signal permet de fournir des indications relativement précises sur la présence de planètes autour de celui-ci.

Malheureusement, l'intérêt de cette méthode est fortement limité de part la rareté des pulsars, mais également du fait que leur voisinage est néfaste à la présence de la vie sur la planète en orbite, à cause des radiations de haute énergie dégagées. Malgré tout, cette technique reste utilisée de par son extrême précision, permettant de détecter des planètes d'une masse équivalente au dixième de celle de la Terre, précision dépassant largement celle des autres méthodes.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
PSR B1257+12 B PSR B1257+12 C	1992	Pulsar Timing	Très précise

2.4.2.1.4. Transit planétaire (Transit method)

La méthode de détection par transit se base sur une observation relativement simple: quand l'inclinaison de l'orbite d'une planète par rapport à l'utilisateur est proche de 90 degrés (Figure 31), alors, lorsqu'elle passera devant son étoile, la luminosité mesurée de cette dernière sera diminuée. Cette méthode requiert une grande quantité d'observations concernant l'étoile étudiée, et permet de fournir des informations relatives à la taille et au rayon de la planète responsable du transit.

Cependant, en plus des contraintes liées aux positions des orbites nécessaires pour appliquer cette méthode, un défaut majeur de cette approche demeure l'importante quantité de fausse détection qu'elle engendre, et de ce fait, sa nécessité d'être couplée à une autre méthode de détection, habituellement la mesure de la vitesse radiale [Donovan & al., 2006]. Un des intérêts du couplage de ces deux méthodes provient également des informations fournies sur la planète trouvée, se révélant au final complémentaires. En effet, la méthode du transit nous fournit des indications sur la taille de la planète observée, tandis que la mesure des vitesses radiales nous informe sur sa masse. Ces deux données combinées permettent donc d'obtenir des précisions sur la densité de la planète, et ainsi, sur sa composition interne. Enfin, des informations relatives à la température de la planète ou à la composition de son atmosphère peuvent être extraites à partir d'observations réalisées par la méthode des transits.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
OGLE-TR-56 b	2002	Transit	HD 209458 b , a été découverte en transit en 1999, mais celle-ci été déjà découverte à l'aide d'une autre méthode (spectrométrie)

2.4.2.1.5. Microlentilles gravitationnelles (Gravitational microlensing)

Les microlentilles gravitationnelles sont un phénomène astronomique rare, apparaissant lorsque la lumière issue d'une étoile lointaine est déviée par le champ gravitationnel d'une seconde étoile plus proche de l'observateur. L'intérêt majeur de cette méthode de détection est sa capacité à repérer des objets de tailles très variables (de la planète à l'étoile), et ce, indépendamment de la lumière qu'ils émettent. La durée de ce phénomène dépend de nombreux paramètres, et peut, selon les circonstances, s'étaler de quelques jours à de nombreuses semaines.

La détection d'exoplanète se déroule de la manière suivante :

En premier lieu, il est nécessaire de posséder une grande quantité d'informations concernant l'image de l'étoile ou de la zone d'espace déformée par l'effet de lentille, afin de détecter la dite déformation. Celle-ci peut être de différentes natures, telles qu'une distorsion multiple ou encore une image magnifiée. Lorsqu'un phénomène de microlentille gravitationnelle est observé, alors, il est possible qu'une planète en orbite autour de l'étoile jouant le rôle de « lentille » ait une influence mesurable dans la déformation observée, et ce, même si la masse de la planète est faible.

Ainsi, tant que le phénomène est en cours, de nombreuses observations sont effectuées avant d'être confrontées à un modèle théorique permettant de déterminer la présence ou non d'une exoplanète autour de l'étoile.

Cependant, de par la nature même du phénomène observé, une des limites à noter est le caractère non reproductible de l'événement. De plus la vérification que l'artefact visuel observé est bien lié à un phénomène de microlentille gravitationnelle et non une conséquence d'un autre phénomène astronomique est une tâche complexe.

Notons également que cette approche n'est pas réservée à la détection des exoplanètes, son efficacité étant également prouvée pour la recherche de corps sombres et massifs, tels que les naines brunes, rouges, ou encore les trous noirs.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
OGLE-2003-BLG-235L b	2003	Microlentilles gravitationnelles	

2.4.2.1.6. Imagerie Directe (Direct imaging)

Finalement, la dernière des techniques est celle pouvant être considérée comme la plus triviale de toutes : l'imagerie directe. Sa difficulté de mise en œuvre provient de plusieurs points, et en particulier du fait que les planètes sont de très faibles sources de lumières (elles n'en n'émettent pas, se contentant de diffuser celle de son/ses étoile(s)), très souvent masquées par leurs étoiles. Une autre limite provient également de la puissance des équipements utilisés, les télescopes terrestres d'une puissance suffisante pour visualiser une exoplanète dans certaines conditions (que sa taille soit importante et son orbite lointaine) étant actuellement en construction. Cependant, l'évolution rapide des techniques de traitement d'images, liées aux avancées de la coronagraphie font de ce type d'observation une approche prometteuse, en particulier grâce à l'utilisation de futur télescopes spatiaux.

En juillet 2004, l'utilisation du VLT a permis de produire une image de la planète 2M1207b.

Premières planètes découvertes grâce à cette méthode :

Nom	Année	Méthode	Note
2M1207 b	2004	Imagerie directe (infrarouge)	Orbite autour d'une naine brune
1RXS J160929.1-210524	2008	Imagerie directe (infrarouge)	Orbite autour d'une étoile semblable au soleil, à confirmer.
Fomalhaut b	2008	Imagerie directe (visible)	

2.4.2.2. Autres méthodes

Au-delà de ces méthodes éprouvées, certaines approches sont à mentionner, bien que moins utilisées en pratique.

Tout d'abord, la polarimétrie, qui est une méthode consistant à étudier la polarisation de la lumière combinée issue de l'étoile et de la planète. Une lumière est dite polarisée lorsqu'elle interagit avec des molécules présentes dans l'atmosphère d'une planète. L'étude de cette polarisation permettrait de découvrir des exoplanètes, bien qu'à l'heure actuelle, les groupes utilisant cette approche (ZIMPOL/CHEOPS 2004 & PLANETPOL 2006) n'ont obtenus aucuns résultats précis.

Ensuite vient l'observation des systèmes binaires (possédant 2 étoiles), et plus précisément des éclipses apparaissant dans de tels systèmes. La configuration à étudier nécessite ici encore certaines conditions sur les orbites des étoiles, à savoir qu'elles se croisent, provoquant ainsi des éclipses, durant lesquelles la lumière émise par le système est minimale. En mesurant les périodes des différentes éclipses, on pourrait prévoir la présence de planètes dans le système, ce qui modifierait la trajectoire des orbites des étoiles et décalerait légèrement le moment l'éclipse par rapport aux prévisions.

2.4.2.3. Conclusion

Pour résumer, nous remarquons que la position d'observation, en particulier l'orientation des orbites, joue un rôle majeur afin de déterminer quelles méthodes appliquer. De plus, les méthodes ne subissant pas cette contrainte, comme par exemple les microlentilles gravitationnelles, reposent sur des phénomènes physiques complexes, précis, et relativement rares.

Un autre des critères discriminant est la taille de la planète à rechercher, certaines méthodes, étant particulièrement sensible à cette contrainte, ne repèrent que les plus immenses d'entre elles. Enfin, concernant les missions en cours ou à venir pour la recherche d'exoplanètes, le site suivant possède une liste complète et à jour, annotée des statuts de chacune, et de leurs éventuels succès : <http://exoplanet.eu/searches.php>.

Résumé des différentes approches :

Méthode de détection	Fonctionnement	Particularités	Date de 1 ^{ère} découverte
Astrométrie	Mesures de position		2002
Vitesses radiales	Mesure des mouvements en étudiant le spectre de l'étoile	Importance de l'orientation des orbites	1995
Pulsar Timing	Chronométrage	Découverte d'exoplanète « par hasard »	1992
Transit planétaire	Evolution de la luminosité de l'étoile	Importance de l'orientation des orbites	2002
Microlentilles Gravitationnelles	Etude de la déformation de l'image d'une zone d'espace connue	Phénomène non reproductible	2004

Du point de vue quantitatif, la répartition des découvertes par méthodes est la suivante.

Méthodes	systèmes planétaires	planètes	systèmes planétaires multiples
Exoplanètes détectées par vitesses radiales ou par astrométrie <i>mise à jour : 23 Mars 2009</i>	214	260	33
Planètes en transit <i>mise à jour : 17 Mars 2009</i>	58	58	0
Exoplanètes détectées par microlentille <i>mise à jour : 19 Septembre 2008</i>	7	8	1
Exoplanètes détectées par imagerie <i>mise à jour : 24 Novembre 2008</i>	9	11	1
Exoplanètes détectées par chronométrage <i>mise à jour : 25 Novembre 2008</i>	4	7	2
Nombre Total d'exoplanètes découvertes		344	

2.4.3. Quelques exoplanètes remarquables

Cette partie recense quelques planètes remarquables, de par leur symbolique, pour avoir été les premières découvertes par certaines méthodes, mais également celles possédant des caractéristiques physiques extrêmes ou étranges.

2.4.3.1. Upsilon Andromedae (1999)

Le premier système multi-planétaire à être découvert près d'un ensemble d'étoiles. Il se compose de 3 planètes du type de Jupiter, dont les découvertes ont été annoncées en 1996 pour la première, et 1999 pour les deux suivantes. Ce système possède des orbites non coplanaires.

2.4.3.2. Mu Arae c (2004)

Mu Arae c est la première planète à être caractérisé comme « super-terre ». Détectée à l'aide du calcul de vitesse radiale, elle possède une masse de 10.5 Terre.

2.4.3.3. HD 149026 b (2005)

Cette exoplanète découverte en juillet 2005 possède le plus gros cœur connu, d'une masse estimée à 70 fois la masse de la Terre. Ce cœur compte d'ailleurs pour les deux tiers de la masse totale de la planète.

2.4.3.4. TrES-4 (2006)

Détectée à l'aide de la méthode des transits, cette exoplanète était lors de sa découverte la plus grande jamais observée, mais également la moins dense, avec 0.84 fois la masse de Jupiter pour 1.674 fois sa taille. Sa densité est de 0.24 grammes par centimètres cubes, ce qui est comparable au balsa.

2.4.3.5. Gliese 581 c (2007)

Découverte annoncée le 24 avril 2007, grâce à la technique des vitesses radiales, cette exoplanète est une des candidates les plus favorables concernant la présence d'eau liquide, et par extension, de vie. En effet, sa position relative à son étoile permettrait la présence d'eau à l'état liquide, bien que les études suivantes tendent à prouver que cette planète souffrirait du même phénomène que Vénus. Cependant, dans le même système, la planète Gliese 581 d est également un candidat prometteur pour la détection d'eau liquide [Than, 2007].

2.4.3.6. HD 189733 b (2008)

En 2007, de la vapeur d'eau et du méthane ont été découverts dans l'atmosphère de cette exoplanète, suite à l'étude de son spectre. Bien que les conditions à la surface de HD 189733 b soient inhospitalières et ne permettent pas la présence de vie (cette planète est une géante gazeuse du type des Jupiter chauds), l'étude de cette exoplanète est la première ayant mené à la découverte de molécules essentielles à l'existence d'une vie organique [Swain, 2008].

2.4.3.7. Fomalhaut b (2008)

Fomalhaut b est la première exoplanète à avoir été observée directement, en 2008, bien que son existence était supposée dès 2005 à l'aide de l'observation de ses interactions avec un disque de débris [Quillen, 2005].

2.4.3.8. COROT-Exo-7b (2009)

Cette exoplanète est en orbite proche de COROT-Exo-7, à savoir moins de 0.02 UA. De plus son diamètre équivalent à 1,7 fois celui de la Terre en fait la plus petite exoplanète mesurée pour le moment. Sa température à la surface est estimée aux environs de 1000-1500 °C de par sa proximité avec son étoile.

2.5. A la recherche de la vie

2.5.1. Techniques de détection

L'étude de la vie sur Terre a permis de définir quels étaient les indices fiables du vivant, et comment les détecter. La plupart des données, prises isolément, ne pourraient pas constituer une preuve. C'est en les rassemblant que l'existence d'une vie présente ou passée pourra être avérée.

2.5.1.1. Structures macroscopiques et microscopiques

Avant d'envisager des méthodes de détection chimiques, il est possible d'utiliser nos "yeux". Bien sûr l'Homme n'envoie pour le moment que des missions robotisées, mais celles-ci disposent de tout un équipement photographique qui en font les "yeux" de l'Homme dans l'espace à différentes échelles.

Commençons par l'échelle macroscopique : si une sonde se retrouve face à un arbre ou face à un être mobile ses caméras le détecteront rapidement. Mais ce genre de rencontre n'est pas dans les probabilités envisageables pour le moment, il faudra attendre d'avoir trouvé des exoplanètes viables et de pouvoir y envoyer des sondes. Cependant même une vie microscopique peut laisser des traces macroscopiques : microbialites (voir 2.1.1.2.2.) de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres de haut, "tapis" microbiens de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur. Ces structures restent observables après la mort des micro-organismes qui les ont formées, permettant de détecter autant une vie passée que présente.

A l'échelle microscopique se révèlent les micro-organismes eux-mêmes, ou leurs éventuels fossiles. Des colorants spécifiques permettent de mettre en évidence les micro-organismes vivants ou

certaines de leurs composants (ADN, membranes lipidiques...). Différents types de microscopes optiques permettent d'avoir accès à cette échelle de manière large ou en trois dimensions.

L'échelle nanométrique permet d'avoir accès aux structures des éléments de la cellule et aux nano-fossiles d'éventuels organismes particulièrement petits. Les instruments utilisés sont le microscope électronique à transmission (deux dimensions, très fort grossissement) ou à balayage (trois dimensions, grossissement moins important) ainsi que le microscope à force atomique (trois dimensions, très fort grossissement).

2.5.1.2. Mise en culture

Si un organisme extraterrestre pouvait être mis en culture, nous aurions alors la certitude qu'il est vivant. De plus sa mise en culture permettrait d'étudier son métabolisme, ses composants... Il faut cependant garder en mémoire que nous ne savons pas cultiver tous les micro-organismes terriens. Même si un milieu de culture est conçu à partir de ce que l'on sait de l'environnement étudié, il n'est donc pas certain que des micro-organismes vivant dans cet environnement pousseraient sur le milieu synthétique.

2.5.1.3. Molécules organiques

Certaines molécules sont caractéristiques du vivant. Elles peuvent être des produits du métabolisme ou des constituants de structure des organismes. Parmi les produits du métabolisme se trouvent certains composés gazeux qui peuvent être détectés si l'échantillon étudié est enfermé dans un caisson étanche et que l'air est analysé. Les composés non gazeux peuvent être analysés directement à partir de l'échantillon, éventuellement après une étape d'extraction par des solvants organiques pour isoler certaines classes de composés. Les techniques utilisées pour ces analyses sont la spectrométrie et la chromatographie (technique de séparation basée sur les différences d'affinités des composés pour une phase mobile et un support fixe).

La détection de composés du métabolisme indiquerait une vie présente, alors que certains composés de structure, assez stables, permettent de détecter aussi une vie passée.

2.5.1.4. Rapports isotopiques du carbone

Tous les atomes existent sous plusieurs formes, dits isotopes, plus ou moins lourds. Certains de ces isotopes sont stables alors que d'autres sont instables et se désintègrent en libérant de l'énergie : c'est la radioactivité. Pour le carbone il existe principalement deux isotopes : le ^{12}C (prononcer "carbone 12") et le ^{13}C , tous deux stables. L'isotope radioactif du carbone est le ^{14}C , peu abondant, qui est utilisé pour la datation. Les deux isotopes intéressants pour la détection de traces de vie sont les isotopes stables. Les proportions naturelles des quantités de ces deux isotopes sont constantes du fait de leur stabilité. Mais, lors des réactions de fixation du carbone minéral en carbone organique par les organismes vivants, le ^{12}C , plus léger, est favorisé par rapport au ^{13}C , plus lourd. Ce phénomène a pour conséquence une plus grande proportion de ^{12}C dans la matière organique des organismes qui sont capables de ces réactions de fixation, ainsi que dans les organismes qui se nourrissent de ces derniers. La mesure des rapports isotopiques du carbone permet donc d'indiquer si des molécules organiques ont une origine biologique ou chimique.

2.5.1.5. Chiralité

Comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.4, certaines molécules organiques sont asymétriques et la vie n'utilise alors qu'une seule des deux formes possibles. L'utilisation des deux formes, qui sont présentes en quantités équivalentes dans l'environnement, ne permet pas de structures tridimensionnelles stables. Ceci suggère que quel que soit l'endroit où la vie apparaîtrait, elle n'utiliserait qu'une seule des deux formes (mais pas forcément la même que sur Terre). Dans des

terrains froids cette caractéristique est conservée longtemps par les restes des organismes morts. La mesure de la chiralité permettrait donc de détecter des traces de vie présente et passée.

2.5.2. Les missions envoyées

La plupart des missions envoyées jusqu'à aujourd'hui avaient davantage pour but de rechercher des traces de matière organique ou des conditions dans lesquelles la vie (ou ses traces) ont pu subsister, que la recherche de la vie elle-même. C'est aussi dans ce contexte que les sondes de survol sont des outils précieux pour définir des lieux précis où envoyer des atterrisseurs, plutôt que de larguer ces derniers au hasard sur la planète étudiée.

2.5.2.1. Vers Mars

Mariner 1 (1965) à Mariner 9 (1971) : La planète se révèle un désert aride, alors que jusque là les variations saisonnières de couleurs étaient interprétées comme de la végétation.

Viking (1976) : Le sol de Mars est pauvre en matières organiques, probablement à cause de la présence de puissants oxydants, comme l'eau oxygénée (H_2O_2). La surface de la planète présente des traces d'écoulement d'eau dans le passé.

Mars Global Surveyor (1997) : Découverte de ruissellements d'eau récents. Cartographie satellite de la planète.

Mars Odyssey (2001) : Mise en évidence de glace d'eau enfouie aux pôles de la planète.

Mars Express (2003) : Confirmation de la présence d'eau dans le passé, découverte d'argiles (qui se forment en présence d'eau).

Mars Exploration Rover (2004) : Découverte de minéraux caractéristiques d'une formation en présence d'eau (hématite)

Phoenix (2008) : doit étudier l'histoire de l'eau au pôle Nord martien.

Mars Science Laboratory (2010), Exomars (2013)

2.5.2.2. Vers les satellites des géantes gazeuses

Voyager (1979) : Europe est couverte de glace et sa surface est renouvelée, probablement par cryovolcanisme, ce qui suggère un sous-sol liquide. Titan présente une atmosphère dense, composée d'azote (N_2) et de méthane (CH_4).

Galileo (1989) : Système de Jupiter. Sous la surface glacée d'Europe (10km de glace), un océan reposerait sur le sol rocheux.

Cassini-Huygens (2004) : Système de Saturne. Sur Titan le méthane forme un cycle comme l'eau sur Terre ; l'atmosphère est le siège d'une chimie organique complexe ; la couche de glace de surface se déplace, suggérant un océan sous-glaciaire. Encelade émet des panaches d'eau et de molécules organiques par les "rayures du tigre" au pôle sud ; de grandes zones dénuées de cratères témoignent d'un renouvellement partiel de la surface.

Europa explorer (2015), Laplace (en développement), Titan/Saturn System Mission (2017)

2.5.2.3. Vers les comètes

VEGA et Giotto (1986) : Comète de Halley. Les grains de comète contiennent des composés organiques complexes.

Deep Impact (2005) : Comète Tempel 1. Le noyau contient de grandes quantités d'eau.

Stardust (2006) : Comète Wild 2. Les comètes ont évolué chimiquement depuis leur formation, contrairement à ce que l'on pensait.

Rosetta (2014) : Comète Churyumov-Gerasimenko. Un module effectuera un forage du noyau et analysera la surface et la sous-surface.

3. Une vie extraterrestre intelligente ?

En plus de la recherche d'une trace de vie au sens biologique du terme, d'autres scientifiques ont tenté de répondre à la question « Existe-t-il d'autres civilisations intelligentes / technologiquement avancées dans l'Univers ? ». En plus d'avoir développé quelques théories et démystifié certains mythes, de grands projets ont vu le jour dans le but de répondre à cette question.

3.1. Probabilité de rencontre et/ou d'existence

3.1.1. Equation de Drake

Cette équation établie en 1961 par le mathématicien Frank Drake permet de donner une estimation du nombre de civilisations en dehors du Système Solaire avec lesquelles nous pourrions communiquer (N_{civ}) [Zarka et al., 2008], [Sillard et al. 2007] :

$$N_{civ} = F_{ét} \times P_{pla} \times N_{pla} \times P_{vie} \times P_{intel} \times P_{com} \times T ,$$

où :

- $F_{ét}$ est le nombre d'étoiles en formation par année dans notre galaxie,
- P_{pla} est la probabilité (donc comprise entre 0 et 1) qu'une étoile possède des planètes,
- N_{pla} est le nombre moyen de planètes où la vie peut se développer par étoile,
- P_{vie} est la probabilité que la vie apparaisse sur ces dernières,
- P_{intel} est la probabilité qu'une intelligence se développe,
- P_{com} est la probabilité que ces dernières formes de vie développent une technologie et désirent communiquer,
- T est la durée de vie moyenne d'une civilisation (ou la durée moyenne pendant laquelle une éventuelle communication peut être détectée).

En effectuant un bilan de nos connaissances actuelles sur l'Univers, nous pouvons donner des estimations plus ou moins optimiste des termes de l'équation [Zarka et al., 2008]. Seule T est une parfaite inconnue. Ainsi, avec un bilan optimiste le projet SETI (cf. paragraphe 3.3) s'en est trouvé grandement motivé. Par conséquent, malgré son apparente rigueur mathématique, cette équation peut donner des résultats allant de valeurs proches de zéro à quelques milliers, suivant les hypothèses et les marges pour les différents paramètres prises.

Nous pouvons néanmoins affirmer avec certitude que $N_{civ} = 1$ puisque l'Humanité existe, mais cela impliquerait que nous soyons seuls. Des recherches pour estimer ces paramètres sont en cours (un article proposant une méthode d'estimation est donné en annexe).

3.1.2. Le paradoxe de Fermi

Le physicien Enrico Fermi s'est également penché sur la question de l'existence de civilisations extraterrestres [Zarka et al., 2008], [Sillard et al. 2007]. Mais plutôt que de répondre avec une équation, Fermi établit un raisonnement à partir de la supposition de l'existence d'une seule civilisation extraterrestre ayant développé un moyen de voyage intersidéral, Cette civilisation serait

intéressé par la conquête de notre galaxie, dont la colonisation de mondes durerait de cent à quelques milliers d'années, procéderait étapes par étapes et enverrait après colonisation de nouveaux des dizaines d'appareils. Le problème est alors le suivant : sachant que la galaxie serait après quelques centaines de milliers d'années sous l'emprise de cette dernière, pourquoi nous n'en voyons aucune trace ?

Il est aisé d'en déduire automatiquement que l'hypothèse de départ est fautive. Ce paradoxe fait d'ailleurs l'objet de nombreuses objections et contre-objections [Zarka et al., 2008]. Parmi elles, citons notamment le fait que toutes les civilisations ne sont pas expansionnistes et par conséquent peuvent choisir de ne pas coloniser d'autres systèmes ; objection à laquelle il est répondu qu'il suffirait d'une seule espèce (nous le sommes). Notons aussi que dans [D'Hedencourt, 2006], l'auteur critique le programme SETI en se servant notamment du paradoxe de Fermi. Les débats restent ouverts dans la communauté scientifique concernant ce paradoxe.

Même si ces théories sont encore aujourd'hui objet de débat elles restent incontournables dans l'histoire de la recherche de civilisations extraterrestres.

3.2. Phénomènes aérospatiaux expliqués et inexpliqués

Ce paragraphe traitera des phénomènes inexpliqués, plus communément appelés OVNIS (Objets Volants Non Identifiés). Commençons tout d'abord par réfuter l'amalgame qu'un OVNI est forcément un engin spatial d'une civilisation extraterrestre qui a servi d'argument de nombreuses fois aux détracteurs de l'étude des OVNIS. Une autre définition a été proposée par le GEIPAN (Groupement pour l'Etude et l'Information sur les Phénomènes Aérospatiaux Non-identifiés) consistant à remplacer le terme OVNI par PAN, pour Phénomènes Aérospatiaux Non-identifiés. Du coup, des avions volants à basse altitude de nuit (et à hélice de surcroît faisant ainsi peu de bruit) peuvent être difficilement identifiables et par conséquent être considéré par des PAN par la personne les ayant vu.

De même, il existe dans la nature des nuages qui peuvent avoir des formes bien particulières : les nuages lenticulaires. La figure 32 montre un de ces fameux nuages dont la confusion avec une soucoupe volante est facile à faire.

Ces contre-exemples démontrent que les OVNIS ne signifient pas automatiquement que l'on a affaire à des engins venus d'ailleurs mais qu'il peut surtout s'agir de phénomènes terrestres d'origine humaine ou naturelle.

3.2.1. Les organismes d'études

Ces phénomènes sont étudiés par divers organismes de nombreux pays, publics ou relatifs à la défense aérienne. Ainsi en Belgique, c'est le COBEPS (Comité Belge d'Etude des Phénomènes Spatiaux, anciennement SOBEPS) qui étudie ces phénomènes, alors qu'en Grande-Bretagne, c'est une cellule du ministère de la défense qui se chargeait des enquêtes [Norlain et al., 1999], [Sillard et al. 2007]. En Amérique Latine, les observations sont rapportées par des bureaux spéciaux de l'Armée de l'Air, comme au Pérou ou en Argentine [de Mazery, 2008]. Seul le Chili a un organisme ne dépendant pas de l'armée, le CEFAA (Comité d'Etude des Phénomènes Aériens Anormaux) créé en 1997 à l'initiative de la Direction Générale de l'Aviation Civile chilienne [Sillard et al. 2007]. Peu de choses sont connues quant à la Chine ou la Russie [Sillard et al. 2007], si ce n'est que le KGB notait les observations et les étudiait en collaboration avec l'académie des sciences de l'URSS [Norlain et al., 1999].

Concernant les Etats-Unis, les archives sont très difficiles à obtenir. En effet, les OVNIS sont étudiés par l'Armée de l'Air en collaboration avec les organismes d'espionnages et de contre-espionnages (CIA et NSA). Cette politique du secret a conduit à de nombreuses attaques en justice de la part de simples particuliers contre l'Etat Américain [de Mazery, 2008] Cependant, le Dr Richard F. Haines,

ancien responsable du bureau des Space Human Factors de la NASA a créé le NARCAP (*National Aviation Reporting Center on Anomalous Phenomena*) en 2000 qui collecte les observations des pilotes (civils ou militaires) de phénomènes aériens « inhabituels » [Sillard et al. 2007], [de Mazery, 2008].

En France, c'est en 1977 qu'un organisme public chargé de l'étude des OVNI, que nous appellerons également PAN (Phénomènes Aérospatiaux Non identifiés, définition plus « propre »), a été créé à l'initiative de la direction générale du CNES : le GEPAN (Groupement pour l'Etude des PAN). Ayant changé de nom une première fois en 1988 pour le SEPRA (Service d'Etude des Phénomènes de Rentrée Atmosphérique) sans toutefois changer sa mission initiale, cet organisme a vu ses moyens très largement diminués et son effectif se réduisit à son seul directeur, Jean-Jacques Velasco. En 2001, cette situation devint intolérable pour le directeur général du CNES de l'époque, Gérard Brachet, qui fit exécuter un audit sur la légitimité de cet organisme au sein du CNES et les orientations à lui donner. C'est à la suite du rapport d'audit qu'en 2005 le GEIPAN fut créé. En plus de rendre compte de ses travaux à un comité de pilotage composé d'experts en différents domaines (météorologistes, membres de la DGAC, etc.), cet organisme a pour nouvelle mission de rendre public ses travaux ainsi que toutes leurs méthodologies (disponibles sur leur site internet <http://www.cnes-geipan.fr/>) dans un souci principal de transparence. De plus, avec la mise à disposition du public les différentes enquêtes, il y a de plus grandes chances que des cas autrefois inexplicables soient expliqués par l'apport d'un fait nouveau par un particulier. Il est à noter que ce travail d'information est encore loin d'être achevé. Dans la suite du document, suivant la date du témoignage relaté, nous utiliserons l'un ou l'autre de ces trois termes.

3.2.2. L'étude du GEIPAN : méthodologie et exemples de témoignages

Les PAN ont été classifiés en quatre catégories par le GEIPAN [Norlain et al., 1999] :

- PAN A : le phénomène peut être parfaitement expliqué avec preuves à l'appui,
- PAN B : le phénomène peut être expliqué par la conviction des enquêteurs sans que des preuves formelles puissent appuyer l'hypothèse privilégiée,
- PAN C : le phénomène est inexplicable par manque de données, il s'agit de cas inexploitable,
- PAN D : le phénomène reste inexplicable dans l'état actuel de nos connaissances scientifiques, malgré la qualité de l'enquête et l'exhaustivité des données recueillies.

Cette dernière catégorie reflète bel et bien la mission du GEIPAN qui se « limite » après enquête à l'explication scientifique du témoignage mais exclut la formulation d'hypothèses difficilement démontrables, ni à faire des recherches scientifiques quel que soit le domaine. En 2007, le GEIPAN recensait 6000 observations depuis les années 50. Cependant à ce jour tous les résultats ne sont pas encore utilisables dû au long travail de regroupement. Ainsi, compte tenu de cette contrainte et en faisant abstraction des PAN C (donc inexploitable), 3630 observations restent exploitables, dont même si 77% des cas ont pu être expliqués (PAN A et B), il reste 23% de ces derniers inexplicables [Sillard et al. 2007].

Le GEIPAN travaillant sur les témoignages, une procédure est mise en œuvre. Tout d'abord, les témoignages sont recueillis par la Gendarmerie Nationale. De par une procédure suivie rigoureusement (enquête systématique, procès verbaux, aucune déformation par transmission), de par le sérieux de la profession et leur facilité d'intervention sur les lieux de par leur répartition sur l'ensemble du territoire, ce recueillement permet d'obtenir assez facilement des témoignages fiables et éviter les plaisanteries (il existe des exceptions comme nous allons pouvoir le voir). Les témoins sont de toutes origines : sociales, professionnelles, ethniques, etc. De ce fait, l'idée reçue des PAN observés uniquement par des gens « simples » s'en trouve vite balayée, tout comme il faut se débarrasser de tout préjugé psychopathologiques sur ces témoins. Pour aborder ces témoignages de manière rigoureuse, le GEPAN a développé une méthode d'analyse se basant sur tous les

« observables » : témoin, environnement psychosocial et physique, qualité du témoignage. Ces domaines ne peuvent pas être considérés indépendamment les uns aux autres (non-séparabilité des domaines d'analyse). La Figure 33 représente bien les domaines d'analyse et leurs interactions. La situation du stimulus, inatteignable et non reproductible, se trouve bien représentée par ce schéma. Lors de l'analyse chaque sommet de ce tétraèdre est exploré afin de recueillir le maximum de données ce qui permettra de déduire ce qui a provoqué le stimulus et le rapprocher d'un des sommets du tétraèdre (par exemple, l'analyse de l'environnement pourrait identifier une confusion avec un astre).

Les questionnaires types suivant la profession du témoin (astronomes, pilote, autres) sont présents en annexe. Au-delà des simples témoignages, le GEIPAN peut faire appel à des organismes extérieurs (laboratoires, entreprises, etc.) pour certaines analyses, comme par exemple l'analyse du sol dans le cas de traces ou l'analyse d'un objet. Enfin, afin d'améliorer le nombre et la qualité des enquêtes, le GEIPAN a mis en place un réseau d'Intervenants de Premier Niveau (IPN), réseau d'enquêteurs bénévoles ayant démontré une certaine expérience à l'enquête de terrain. Leur répartition se voulant être sur l'ensemble du territoire français, leur rôle est d'assurer une veille sur leur secteur géographique afin de faire remonter au GEIPAN des informations pertinentes. De plus, ils doivent effectuer des enquêtes de proximité sur des cas fournis par le GEIPAN. Il leur est d'ailleurs distribué des questionnaires spécifiques à la profession interrogée (astronomes, aviateurs d'aéro-club, autres) qui sont disponibles sur le site du GEIPAN et fourni en Annexe du présent document.

3.3. Recherche de signaux envoyés par des extraterrestres

3.3.1. SETI : Généralités

Les différentes activités consistant à rechercher une vie extra-terrestre intelligente sont regroupées sous le nom SETI, signifiant « Search for Extra-Terrestrial Intelligence ». Ainsi, lorsque l'on parle de projet SETI, c'est l'objectif final qui est indiqué, et non le nom du projet en lui-même. Il existe deux grandes catégories de projets SETI. Le plus connu est celui consistant à détecter les signaux radios, alors que le second repose sur la captation de messages transmis par le biais de lasers.

3.3.1.1. Radio SETI

La recherche d'une vie extra-terrestre intelligente passe par la détection des signaux qu'ils peuvent émettre, volontairement ou non. L'approche la plus utilisée ici est « d'écouter le ciel », et d'analyser les résultats obtenus, dans l'espoir de discerner un motif répété et singulier pouvant indiquer une tentative de communication.

Les premières expérimentations de cette méthode remontent à 1960, année où Frank Drake mena le projet Ozma, consistant à étudier une zone précise de l'espace à l'aide d'un radiotélescope, scannant une bande de fréquence précise autour d'une fréquence dite marqueur. Cette tentative fut un échec, dans le sens où elle n'offrit aucun résultat concluant, mais elle marqua un précédent dans l'histoire des projets SETI et fut la première d'une longue série.

En 1971, la NASA finança une étude qui produisit un rapport concernant la création d'un ensemble de radiotélescopes terrestres, connu sous le nom de « projet Cyclope ». Bien que ce projet n'ait pas abouti, le rapport a servi de base à de nombreux projets SETI qui suivirent.

Une des dates clés des projets SETI est le 15 Aout 1977, correspondant à la réception de ce qui sera appelé le « Wow ! signal ». Ce jour là, le Dr. Jerry R. Ehman détecta un signal singulier qu'il entourait de rouge et annota du mot « Wow ! », ce qui lui donna le nom de « Wow ! signal ». Ce signal est considéré comme le meilleur candidat reçu susceptible d'avoir été émis par une intelligence extra-terrestre, bien que les nombreuses recherches ultérieures n'aient pu le détecter à nouveau. De ce

fait, le manque de récurrence du signal tend à faire passer ce message comme un artefact dû à des conditions particulières, bien qu'à l'heure actuelle, aucune explication précise n'ait été démontrée.

Au-delà de projets ponctuels, un des acteurs majeurs des projets SETI est l'université de Californie, Berkeley, qui lança dès 1979 un projet intitulé SERENDIP (pour « Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations »). Une seconde version de ce projet vu le jour en 1986, et le projet se poursuit jusqu'à aujourd'hui dans sa version SERENDIP IV. Une des particularités de ce projet réside dans son mode d'acquisition de données, qui sera détaillée dans la partie relative aux outils de détection. Le traitement des données issues de SERENDIP IV est lui aussi intéressant, car passant par le célèbre SETI@HOME. En effet, dès 1999, l'université de Berkeley lança ce logiciel permettant aux personnes désirant participer à ce projet de fournir du temps de calcul de leur machine personnelle pour traiter les données issues du projet SERENDIP IV. Ce choix permit de faire face à l'énorme masse de calcul à effectuer, largement au delà des capacités des super calculateurs de l'époque, et marqua aussi un véritable renouveau d'intérêt de la part du public, en réunissant près de 5,2 millions de participants. SETI@HOME apporta également une énorme contribution au monde du calcul distribué marquant la viabilité d'un tel projet, et son efficacité. En août 2008, la puissance de calcul allouée par des ordinateurs personnels au projet correspond à la puissance du second plus rapide des super-calculateurs au monde. De plus, l'état de ses observations peut être consulté à l'adresse suivante : http://setiathome.berkeley.edu/sci_status.html avec une carte de la zone actuellement surveillée.

Au cours des années qui suivirent, la méthode d'écoute demeura identique, seules les évolutions technologiques améliorant la qualité des réceptions, et leur quantité, en arrivant comme ce fut le cas avec le projet META (suivi par le projet BETA) à distinguer les mesures d'origine terrestre et celles venant de l'espace.

Le début des années 90 marque un tournant dans les projets SETI, avec le financement du gouvernement américain, par le biais de la NASA, du projet « Microwave Observing Program » (MOP), censé étudier sur le long terme, d'une part de manière précise 800 étoiles définies, et d'autre part, de maintenir une surveillance globale sur l'espace. Cependant, ce projet fut annulé par le congrès américain un an après son lancement. En 1995, le « SETI Institute » relança ce projet sous le nom « Projet Phoenix », en s'appuyant sur un fond de financement privé. En réponse à cette annulation, la « SETI league » a également été fondée. Cette organisation à but non lucratif se compose de 1500 membres, et se concentre essentiellement sur le « projet Argus », projet consistant à coordonner un réseau global de radio-télescopes amateurs afin d'être capable de couvrir en temps réel l'intégralité du ciel. En guise de comparaison, chacun des 143 télescopes actuellement dans le projet offrent une sensibilité équivalente à celle de « Big Ear », le télescope ayant capté le « Wow ! signal » en 1977.

3.3.1.2. Optical SETI

La recherche d'une communication extra-terrestre peut également se baser sur des signaux visuels, tels que la réception de laser. Cette idée fut lancée en 1961 dans Nature, et détaillée en 1983 par le prix Nobel Charles Townes. La viabilité d'une telle approche, bien que discutée, en particulier dans le rapport « Cyclope » a été confirmée par la suite, avec des études telles que [Exers, 2003].

Le principe de ces projets est de joindre aux télescopes optiques un détecteur de laser, en vue de repérer d'éventuelles communications sous forme de pulse laser. L'une des critiques fréquemment opposée à cette approche provient de l'aspect fortement dirigé du laser : là où les ondes radios peuvent être diffusées de manière multidirectionnelle, le laser est, lui, contraint dans une certaine direction, et soumis aux blocages représentés par les divers objets célestes présent entre la source du laser et sa cible, rendant ainsi la réception d'un message laser provenant d'une longue distance relativement improbable. Cependant, la facilité de détection d'une telle tentative de communication

compense ce défaut, un laser apparaissant à la détection comme un signal bien plus lumineux qu'une étoile.

Parmi les études de ce type, nous pouvons citer le groupe Harvard-Smithsonian et l'université de Princeton qui collaborent dans cette détection de laser, ainsi que Berkeley, possédant 2 équipes sur ce thème, l'une dirigée par Dan Werthimer et poursuivant le même objectif que les équipes précédemment citées, et l'autre dirigée par Geoffrey Marcy, qui pour sa part se focalise sur la détection d'un laser continu.

Tout comme les autres projets SETI précédemment décrits, aucun résultat significatif concernant l'existence d'une vie extra-terrestre intelligente n'a pour l'instant été obtenu.

3.3.2. Les outils de détection

Nous avons vu que ces différentes approches nécessitent une quantité de données impressionnante. Et si leur traitement peut être distribué de manière ingénieuse, à l'image de SETI@HOME, la collecte des données à traiter implique l'utilisation de matériel spécialisé. De ce fait, les données sur lesquelles les projets SETI travaillent ne sont pas issues d'instruments dédiés, mais majoritairement dérivées de mesures effectuées dans des projets différents. Par exemple, SERENDIP utilise les données de radio-télescopes fournies lors de leurs utilisations par d'autres projets, comme le télescope d'Arecibo, ou le VLBI (Very Long Baseline Interferometry) de Medicina, en Italie, auxquels un instrument particulier lié au projet SERENDIP est ajoutés.

De manière similaire, le projet « Optical SETI » du groupe Harvard-Smithsonian utilise les données récoltées par le télescope optique situé à Harvard, auquel a été adjoint un détecteur de laser.

Les projets Optical Seti offrent également un autre type de coopération : les télescopes du groupe Harvard-Smithsonian et ceux de l'université de Princeton sont dirigés sur les mêmes étoiles et traitent les résultats obtenus de manière à limiter le bruit issu des mesures effectuées. Ainsi, la qualité des observations est augmentée comparativement à celles effectuées par un seul des télescopes.

Le projet Argus est également intéressant, de par la mise en commun de moyens relativement limité afin de former un réseau capable de performance honorable, à la manière dont SETI@HOME utilise des ordinateurs personnels pour atteindre la puissance d'un super ordinateur, bien que dans une échelle moindre, tout en conservant un coût raisonnable.

Enfin, citons l'Allen Telescope Array, un radiotélescope interféromètre, issu d'un projet commun de l'institut SETI et de l'université de Berkeley. Prévu pour être composé d'un total de 350 antennes, son lancement se fait en plusieurs phases, la première comportant 42 antennes opérationnelles étant en fonctionnement depuis le 11 octobre 2007.

On constate donc que les idées principales, afin de maintenir des coûts raisonnables et de multiplier la qualité des observations sont d'une part, la mise en parallèle de nombreux équipements de taille modeste dont les résultats sont combinés, et d'autre part, l'ajout d'outils spécialisés à des télescopes puissants en profitant des observations effectuées pour d'autres projets. Ces deux points restent valables, que l'on parle de détection de signaux radio ou optiques, et peuvent bien évidemment être utilisés de manières conjointes.

3.4. Envoi de messages dans l'espace

Différents messages de plusieurs natures ont été envoyés par l'homme dans l'espace, dans l'espoir qu'une hypothétique civilisation dotée d'un minimum d'intelligence les découvre un jour...

Ces messages sont présentés ci-dessous par ordre chronologique et selon 2 catégories qui correspondent, pour la première, aux messages transportés par des objets physiques (essentiellement des sondes) et, pour la deuxième catégorie, aux messages transmis par onde radio.

3.4.1. Objets physiques :

Un certain nombre de sondes ou modules a été envoyé dans l'espace. Nous pouvons considérer que ces appareils ont deux fonctions de base qui sont :

- Explorer et étudier un environnement plus ou moins connu (la Terre, d'autres planètes, des satellites naturels, l'espace sidéral,...),
- Représenter la présence humaine dans l'Univers.

3.4.1.1. La plaque d'Apollo 11 (1969)

Apollo 11 est la première mission spatiale à avoir conduit des humains sur la Lune. C'est la troisième mission à avoir approché la Lune, après Apollo 8 et Apollo 10, et la cinquième habitée du programme Apollo. Lancée le 16 juillet 1969, Apollo 11 emporte le commandant Neil Armstrong, le pilote du module de commande Michael Collins et le pilote du module lunaire Edwin "Buzz" Aldrin. Apollo 11 accomplit la promesse du président John F. Kennedy, prononcée dans un discours en 1961, qui était de se poser sur la Lune avant la fin des années 1960 : « Je crois que cette nation devrait se fixer comme objectif de réussir, avant la fin de cette décennie, à poser un homme sur la Lune et à le ramener sain et sauf sur Terre ».

Les astronautes d'Apollo 11 ont laissé une plaque d'acier inoxydable sur la lune, en commémoration de l'alunissage historique (102h45min après le départ du 16 juillet 1969). Bien que n'étant pas spécialement à destination d'éventuels extraterrestres, cette plaque (voir Figure 36) constitue tout de même le premier message de l'homme laissé dans l'espace. Il y est gravé : « C'est ici que des êtres humains de la planète Terre posèrent pour la première fois le pied sur la Lune, en l'an 1969 après Jésus-Christ. Nous sommes venus en paix pour toute l'Humanité. Neil A. Armstrong, astronaute, Edwin E. Aldrin, astronaute, Michael Collins, astronaute, Richard Nixon, Président des États-Unis d'Amérique. ». La planète terre est également représentée sur cette plaque sous la forme de 2 hémisphères.

Source : Wikipedia

3.4.1.2. Sonde Pioneer 10 (1972)

La sonde **Pioneer 10** (à ne pas confondre avec la sonde lunaire Pioneer X) lancée le 3 mars 1972 fut le premier objet fabriqué par des humains à quitter l'héliosphère.

La mission

La première partie de sa mission (comme pour sa sœur Pioneer 11) consistait à survoler et photographier la planète Jupiter, ce qu'elle réalisa en 1973. Aucune sonde ne s'était jusqu'à cette date aventurée au-delà de la ceinture d'astéroïdes s'étendant entre les orbites de Mars et de Jupiter. Le lanceur Atlas-Centaur à trois étages (jamais utilisé auparavant) accomplit convenablement sa tâche et propulsa Pioneer 10 de Cap Kennedy vers Jupiter à la vitesse record de 51 810 km/h. Après avoir passé sans encombre cette ceinture d'astéroïdes, la sonde se dirigea vers Jupiter, dont l'attraction l'accéléra jusqu'à 132 000 km/h.

Le 3 décembre 1973, Pioneer 10 passa à 130 354 km du sommet des nuages de la planète géante, prenant des photos de celle-ci ainsi que de ses satellites. Elle transmet aussi des informations sur les radiations émises par Jupiter, sur son atmosphère et sa constitution. Ces données furent d'un intérêt capital pour la conception des missions Voyager et Galileo qui suivirent dans les années 1990.

Pioneer 10 prit ensuite une trajectoire vers l'extérieur du système solaire, le long de laquelle elle étudia le vent solaire et les rayonnements cosmiques.

La sonde a utilisé l'assistance gravitationnelle de la planète Jupiter pour accroître sa vitesse et lui permettre de sortir rapidement du système solaire, voyage durant lequel elle étudia le vent solaire et les rayonnements cosmiques tout se dirigeant vers l'étoile Aldébaran, qu'elle devrait atteindre dans environ 2 millions d'années.

La mission de la sonde arriva officiellement à son terme le 31 mars 1997 principalement pour des raisons financières. Des contacts occasionnels avec la sonde continuent néanmoins à se produire. C'est ainsi qu'en 2002, pour le 30^e anniversaire de son lancement, Pioneer 10, malgré son âge et les conditions qu'elle avait rencontrées, fonctionnait encore (même si de nombreux systèmes avaient été arrêtés faute d'énergie, notamment). Le dernier contact avec la sonde, très faible, eut lieu le 22 janvier 2003. La tentative de contact du 7 février 2003 était restée sans réponse comme celle du 4 mars 2006.

Actuellement, Pioneer 10 quitte progressivement le système solaire dans la direction contraire au mouvement du Soleil dans la galaxie. Elle se trouverait aujourd'hui à plus de 80 unités astronomiques du Soleil, soit à plus de 12 milliards de kilomètres de celui-ci. Pioneer 10 continue à s'éloigner du Soleil à plus de 44 000 km/h toujours en direction de l'étoile Aldébaran.

Malgré cela, elle ne détient pas le record de distance à la Terre, celui-ci appartenant à Voyager 1 (pourtant partie plus tard).

Malgré tout, Pioneer 10 demeure utile à la communauté scientifique et continue à lui fournir des données susceptibles de découvertes. Comme celle concernant sa décélération, que les lois de la physique n'expliquent pas pour l'instant. Cette décélération, très faible de l'ordre de $8 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ affecte également Pioneer 11. Ce phénomène a été nommé l'anomalie Pioneer.

La plaque (voir Figure 37)

Pioneer 10 est également célèbre pour porter une plaque d'or gravé sur laquelle apparaissent des représentations d'un couple nu, sans marquer de type racial précis, symbolisant l'humanité, ainsi qu'une représentation de l'atome d'hydrogène, le système solaire avec la place de la Terre, la trajectoire de la sonde, ses dimensions par rapport à notre stature, ainsi que le rythme d'émission des 14 principaux pulsars qui permettront peut-être à nos contacts de situer avec précision son émetteur dans le temps et l'espace. Le dessin fut élaboré par Carl Sagan et Frank Drake et dessiné par Linda Sagan. Cette plaque est explicitement destinée à communiquer des informations sur son origine à une éventuelle intelligence extra-terrestre, qui la trouverait lors de son voyage.

En 1986, Pioneer 10 devint le premier vaisseau que l'homme ait construit à quitter le système solaire, affranchi de l'attraction du Soleil. Il fut suivi de près par Pioneer 11 sur lequel était fixée la même plaque.

Source : Wikipedia

3.4.1.3. Voyager 1 et 2 (1977)

Voyager 1 et 2 sont des sondes spatiales fonctionnant à l'énergie nucléaire ayant réalisé depuis 1977 une moisson d'observations astronomiques qui ont plus d'une fois remis en question les théories planétologiques au cours d'une épopée spatiale d'une durée exceptionnelle et qui se poursuit vers l'espace interstellaire. À elles deux, ces sondes lancées dans une relative discrétion, à l'époque où la NASA peaufinait encore la première version de sa navette spatiale, présentent un palmarès unique : l'exploration du voisinage de Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et 48 de leurs lunes.

Au travers des sondes Voyager, l'humanité tout entière est en route vers les étoiles. Ambassadeurs interstellaires, ces deux engins ont à leur bord un message à destination d'autres êtres doués d'intelligence. La NASA avait débuté l'expérience avec les sondes Pioneer 10 et 11, parties respectivement en 1972 et 1973, qui emportaient une simple plaque gravée représentant un homme et une femme nus, le système solaire et la position de celui-ci.

Cinq ans plus tard, le concept — toujours très optimiste étant donné la faible probabilité que les sondes soient un jour interceptées par une autre civilisation — était nettement amélioré et le contenu du message plus ambitieux et riche. Chaque Voyager renferme un disque de cuivre plaqué or ainsi qu'une cellule et une aiguille pour le lire. Le mode d'emploi se trouve sur la jaquette en aluminium du disque. (voir figures 38 et 39)

Celui-ci contient une série de 116 images. La liste commence par un cercle, la position de notre étoile, la définition des chiffres et des unités employées en physique et quelques paramètres sur le système solaire. Reflet des ignorances de l'époque, Pluton y apparaît comme plus grosse que la Terre, alors que l'on sait désormais qu'elle est plus petite, et n'est plus considérée comme étant une planète, mais une planète-naine.

Suivent plusieurs planches anatomiques dont une tentative d'explication de la reproduction humaine, enfin plusieurs dizaines de photographies d'hommes, d'animaux, de végétaux, de paysages et de constructions humaines où se côtoient pêle-mêle une femme allaitant son enfant, des dauphins, une classe d'école, l'immeuble de l'Organisation des Nations unies à New York (de jour et de nuit...), un astronaute flottant dans l'espace ressemblant étrangement, avec son cordon ombilical, à la silhouette de fœtus figurant elle aussi sur la liste. Le tout s'achève par la photographie d'un violon surmontant la partition d'un quatuor à cordes de Beethoven. Ce même quatuor conclut la liste des vingt-sept morceaux musicaux enregistrés sur le disque. Trois extraits de Bach et un de Mozart, un chant initiatique pour les jeunes filles pygmées, des chœurs géorgiens, et « Johnny B. Goode » de Chuck Berry.

Même si la lecture de ce catalogue peut parfois prêter à sourire, on imagine que le comité de sélection, présidé par l'astrophysicien Carl Sagan, a eu bien du mal à faire son choix. Le disque comporte aussi les salutations des Terriens en cinquante-cinq langues, un message du président américain Jimmy Carter, un autre du secrétaire général des Nations unies, Kurt Waldheim, ainsi que les murmures et grondements de notre planète : pluie, vent, tonnerre, feu, grenouilles, oiseaux, tracteur, décollage d'une fusée, bruits de pas, battements de cœur, rires, vagissements de bébé, etc.

Source : Wikipedia

Des éléments du message (images et sons) : <http://very.re-lab.net/voyagers.html>

3.4.1.4. DVD « Vision of Mars » de la sonde Phoenix lander (sur mars le 25 mai 2008)

Le 25 mai 2008, la sonde Phoenix lander s'est posée avec succès près du Pôle sud de Mars et commença sa mission consistant à rechercher des traces d'eau et des éléments prébiotiques voire organiques dans le sol.

Perdu parmi les instruments de bord se trouve un mini-DVD très particulier qui attendra sans doute très longtemps avant d'être lu (voir figure 40 et 41). Ce mini-DVD a été fabriqué en verre et est prévu pour survivre des centaines, sinon des milliers d'années dans l'environnement martien, jusqu'au jour où sa véritable mission commencera : transmettre ses informations au visiteur qui le trouvera.

En effet, ce disque imaginé par la Planetary Society contient un message adressé par l'Humanité aux générations futures qui viendront fouler le sol martien d'ici un siècle ou davantage. Ce mini-DVD contient les noms de 250 000 personnes qui ont accepté de participer à ce projet. Il contient également Visions of Mars, des messages adressés aux futurs explorateurs de Mars, des récits et des

illustrations de science-fiction inspirées par la planète Rouge. Il contient enfin les messages de personnalités visionnaires telles que Carl Sagan, Arthur Clarke, Louis Friedman - directeur exécutif de la Planetary Society ou encore de Peter Smith, responsable de la mission de la sonde Phoenix auprès de la NASA qui proposa le message « a greeting to the future ».

Source : <http://www.astrosurf.com/luxorion/seti-messages.htm>

3.4.2. Messages radiotélescopes

3.4.2.1. Message d'Arecibo (16 novembre 1974)

La première émission radioélectrique visant ouvertement une civilisation extraterrestre fut effectuée le 16 novembre 1974 avec l'antenne fixe de 300 m de diamètre de l'observatoire radioastronomique d'Arecibo installée à Puerto Rico (voir figure 42). Le message binaire (voir figure 43) mis au point par Frank Drake et son équipe fut envoyé vers l'amas globulaire Messier 13 (voir figure 44) en 169 secondes. Il fut émis avec une puissance de 450 kW à 12.6 cm de longueur d'onde (2380 MHz) dans une bande passante de 10 Hz similaire à celle utilisée par les modems analogiques.

M13 contient uniquement des étoiles âgées, autour desquelles peut-être nous trouverons aussi des civilisations avancées. Situé dans la constellation d'Hercule, il contient 1 million d'étoiles dont certaines ne sont séparées que de 0.5 a.l. l'une de l'autre. Notre chance y est donc plus élevée que notre message soit capté par l'un ou l'autre soleil. Mais cet amas se situe à environ 25 000 a.l., ce qui signifie que si nous recevons une réponse, nous ne devons pas l'attendre avant 50 000 ans : cinq fois le temps que prit l'évolution de l'homme depuis notre ancêtre de Cro-Magnon !

Source : <http://www.astrosurf.com/luxorion/seti-messages.htm>

Décodage du message

Ce message d'Arecibo transmis le 16 novembre 1974 consiste en 1679 impulsions de code binaire (0 et 1). Sa transmission prend un peu moins de 3 minutes à une fréquence de 2380MHz.

La raison pour laquelle ont été choisies 1679 impulsions est mathématique. En effet, 1679 correspond à un produit unique de deux nombres premiers : 23 et 73. Ainsi, il n'y a que très peu de possibilités pour arranger le signal sous la forme d'une matrice, qui aura donc une taille de 23x73.

La figure 45 montre le signal transmis : 1679 nombres binaires (0 ou 1). En considérant l'organisation sous une forme matricielle (en choisissant la bonne forme) et en remplaçant les 0 par des carrés blancs et les 1 par des carrés noirs, nous obtenons le message de la figure 46. Il reste encore à le déchiffrer et en comprendre sa signification.

Le message originel est composé de plusieurs sections, dont chacune traite d'un aspect particulier de notre civilisation. Il comporte en commençant par le haut (voir la figure 47) :

- 1) Les nombres de 1 à 10 codés en binaire. Sans tenir compte de la ligne du bas (qui est la base), en lisant de haut en bas et en prenant les carrés pleins pour 1 et les vides pour 0, nous obtenons exactement les nombres 1 à 10. Les chiffres 8, 9 et 10 sont sur 2 colonnes car il n'est utilisé que 3 lignes alors qu'il en faudrait 4.
- 2) Les numéros atomiques des atomes qui constituent la molécule d'ADN. L'hydrogène a un numéro atomique de 1, le carbone de 6, l'azote de 7, l'oxygène de 8 et le phosphore de 15.
- 3) Les éléments (molécules) dont l'ADN se compose. Chaque base est constituée de 5 colonnes différentes : ce sont les 5 éléments cités précédemment dans le même ordre. Par exemple la décomposition de l'élément ci-dessous donne : 7-5-0-1-0 = H7, C5, N0, O1, P0, ce qui donne : H7C5O ou C5OH7 qui est la formule du désoxyribose.

Les formules présentes sont répertoriées dans le tableau suivant :

Nom de la molécule	Formule	Image
Désoxyribose	C_5OH_7	
Phosphate	PO_4	
Adénine	$C_5H_4N_5$	
Thymine	$C_5H_5N_3O$	
Cytosine	$C_5H_5N_2O_2$	
Guanine	$C_5H_4N_5O$	

- 4) Une représentation de la double structure hélicoïdale de la molécule d'ADN et la partie centrale donne le nombre approximatif de nucléotides dans le génome humain.
- 5) Trois éléments forment la 5^{ème} section :
 - a. au milieu : dessin d'un être humain, peut être le dessin le plus difficile à reconnaître car il n'a aucun lien mathématique.
 - b. à droite : la hauteur moyenne de la population mondiale = $14 \times 126 = 1764$ mm. La colonne est de la même dimension que le dessin. nous parlons donc de la hauteur, puis est codé 14 en binaire (horizontalement). il suffit maintenant de multiplier le 14 par la longueur d'onde de réception du message (126 mm) pour avoir la hauteur.
 - c. à gauche : la population mondiale codée sur 32 bits (haut en bas, puis de gauche à droite) = 4 292 591 583 êtres.
- 6) Un schéma du système planétaire représentant notre étoile, le soleil, et les planètes qui le composent, ceci en mettant à un niveau différent (supérieur) la Terre, puisque c'est l'émetteur du signal et aussi la seule planète habitée. La taille relative des planètes est symboliquement indiquée.
- 7) Le dernier dessin représente le télescope d'Arecibo. En dessous figure le nombre 2430 codé en binaire, qui multiplié par 126 (la longueur d'onde du signal) donne 306,18 m : le diamètre de l'antenne.

Note : suivant les documents, le message présenté peut correspondre à l'image dans un miroir de celui ci-dessus, n'altérant en rien son code binaire et sa signification.

Sources : <http://www.cropcirclesearch.com/articles/arecibo.html>
<http://www.astrosurf.com/univers/Arecibo.htm>
<http://www.omegalima.com/ET/arecibo/index.html>

3.4.2.2. 1^{er} message d'Evaporita – projet « Cosmic Call » (1999)

En 1999, deux physiciens canadiens, Yvan Dutil et Stéphane Dumas ont élaboré un nouveau message qu'ils ont intégré dans le projet « Cosmic Call ».

La première partie du message contenait des informations générales sur la Terre et sur l'humanité (message de Braastad), la deuxième partie comportait le message d'Arecibo de 1974, tandis que la troisième partie reprenait les noms de toutes les personnes ayant participé au projet, chacune pouvant envoyer des dessins, des photos et même des signatures biologiques (cheveux, etc).

L'intégralité du message fut transmise à trois reprises, le 24 mai, le 31 juin et le 1er juillet 1999 à partir de l'antenne de 70 m de diamètre du Evpatoria Deep Space Center situé en Ukraine (voir figure 48) avec une puissance de 148 puis de 152 kW. Il fut émis à destination de quatre étoiles similaires au Soleil : HD 186408, HD 178428, HD 190406 et HD 190360 situées dans des directions où la poussière interstellaire altèrera peu le message au cours de sa propagation. Un extrait du message est donné en figure 49. Un nouveau message fut envoyé le 14 février 2003 dans le cadre du projet « Team Encounter ».

(Décodage du message : [message_Evpatoria.pdf](#) et [message_Evpatoria_2.pdf](#))

Source : <http://www.astrosurf.com/luxorion/seti-messages.htm>

3.4.2.3. 2nd message d'Evpatoria : Interstellar Rosetta Stone (6 juillet 2003)

Le 6 juillet 2003 à 16 h GMT, le centre spatial ukrainien d'Evpatoria en Crimée a envoyé un message (voir figure 50) aux extraterrestres comportant, outre des informations scientifiques, des "lettres" préparées par des habitants de la Terre, qui souhaitent faire connaissance avec d'autres civilisations.

"Les gens de tous les continents parlent de choses qui les touchent, ils veulent trouver des êtres frères dans l'univers", a résumé Richard Braaspad, un responsable du projet Cosmic Call, qui réunit les Etats-Unis, la Russie et l'Ukraine.

Les personnes désireuses d'envoyer un communiqué intersidéral ont payé de 15 à 20 dollars, ce qui a permis aux savants de financer une petite partie du projet spatial, selon un collaborateur de Cosmic call, Alexandre Zaitsev.

Expédié par radiotélescope, le message aux extraterrestres comprend la représentation d'un planisphère et d'un être humain ainsi que des notions mathématiques, géologiques et biologiques. Il a été émis dimanche 6 juillet vers cinq constellations contenant des étoiles similaires au soleil et situées en moyenne à une distance de 30 à 40 années-lumière de la Terre, dont la Grande-Ourse et le Cancer.

Son envoi, prévu initialement à la mi-février, a dû être retardé en raison de problèmes techniques.

Ce message codé est analogue à celui élaboré par deux physiciens canadiens, Yvan Dutil et Stéphane Dumas, qui avait été lancé en 1999 à partir de l'antenne de 70 mètres du Centre d'Evpatoria.

(Décodage du message : [message_Evpatoria_2.pdf](#))

Source : http://www3.sympatico.ca/stephane_dumas/CETI/evpatoria.html

3.4.2.4. Message Cosmic connexion (30 septembre 2006)

Cosmic Connexion, sous-titré « *Le premier message de télévision adressé aux extraterrestres* », est une émission de télévision coproduite par Arte France et Jean-Jacques Beineix via la société Cargo Films, avec le soutien du CNES, d'EADS et du Conseil régional Midi-Pyrénées. Elle a été conçue et réalisée par Marie Cuisset et Anne Jaffrennou.

L'émission fut transmise le 30 septembre 2006, dès 20h40 (20H43 précise), sur le réseau télévisé mais aussi vers l'étoile Errai (ou Gamma Cephei (γ Cephei)) de la constellation de Céphée, via l'antenne du CNES d'Issus Aussaguel, près de Toulouse.

L'idée

L'idée de l'émission est d'envoyer un message aux hypothétiques habitants de la planète orbitant autour d'Errai : Gamma Cephei b. L'interactivité était de mise, puisque les téléspectateurs pouvaient envoyer un message à Errai en le déposant sur le site web créé à cet effet, ou encore par voie postale

à Arte. Ces messages étaient ensuite envoyés (certains faisaient même partie intégrante de l'émission), en même temps que le programme vers Errai.

Au delà d'une réelle communication, il semble plutôt que l'émission ait eu pour but de voir les réactions des téléspectateurs, et plus généralement des humains face aux « petits hommes verts ». En effet, outre les messages, de nombreuses séquences montrèrent l'évolution de l'image de l'extraterrestre dans le temps, les mythes l'entourant, les questions de l'éventuelle communication, ainsi qu'une classification méthodique des extraterrestres de fiction.

L'émission

L'émission débuta à 20h40, sur l'antenne d'Arte, et la transmission par Aussaguel commença quelques minutes après. Elle a duré 160 minutes.

L'originalité de l'émission est qu'elle fut présentée par deux personnages (appelés M&F, pour mâle et femelle, en réalité Marc Larnaudie et Émilie Rochefort), représentés nus sous la forme de dessins en noir et blanc, comme les personnages de la plaque de Pioneer l'étaient. Entre les séquences consacrées aux extraterrestres, ou à la vie ailleurs en général, des pauses étaient marquées pour montrer des échantillons des nombreux messages reçus, tant audio et vidéo que photographiques.

Elle a été déclinée en un DVD contenant des morceaux choisis de l'émission, vendu accompagné d'un livre signé Jean Demerliac et intitulé *Cosmic... : À la recherche des mondes habités*, publiés en marge de l'émission.

L'émission a été rediffusée dans la nuit du 28 octobre 2007, et a également été projetée lors d'un colloque du SETI à l'UNESCO de Paris, le 24 septembre 2008.

Source : Wikipedia

Site : <http://www.cosmicconnexion.com/static/home.html>

Brochure : http://www.artepro.com/fr_fichiers/fichiers/02258218.pdf

Remerciements

Nous remercions André Brack pour nous avoir fournis des documents et pour avoir accepté de vérifier les textes finalisés de l'exposition (brack@cnsr-orleans.fr).

Nous remercions également Monsieur Yvan Blanc (yvan.blanc@cnes.fr), directeur du GEIPAN, pour sa contribution à ce document.

Bibliographie

Exobiologie

- ⊙ Document riche en iconographie
- ◇ Document de vulgarisation en français

- ◇ ⊙ **Brack, A. (2008)**. Futura-Sciences > L'exobiologie : de l'origine de la vie à la vie dans l'Univers. Futura-Sciences. Available at: http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/astronomie-1/d/lexobiologie-de-lorigine-de-la-vie-a-la-vie-dans-lunivers_766/c3/221/p1/.
- ◇ **Brack, A. (2007)**. L'émergence de la vie terrestre. Science et avenir *hors-série juillet/août 2007*, 24-28.
- ◇ ⊙ **CNES (2006)**. Vie terrestre ! Vie extraterrestre ? Cité des sciences. Available at: http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/expositions/vie-extraterrestre/dossier-cnes-exobiologie/accueil-dossier-cnes.php.
- ◇ **Davies, P. (2008)**. Des formes de vie alternatives. Pour la science 365, 32-39.
- ESA Exobiology Team Study (1999)**. Exobiology in the Solar System & the Search for Life on Mars (European Space Agency) *rapport SP-1231* Available at: <http://www.esa.int/esapub/sp/sp1231/sp1231.pdf>.
- Gold, T. (1992)**. The deep, hot biosphere. Proc Natl Acad Sci U S A 89, 6045-6049.
- ◇ **Henarejos, P. (2009)**. Mars : l'eau, le méthane... la vie ? Ciel & Espace 466, 34-37.
- ◇ ⊙ **Où est née la vie ? (2008)**. Pour la science *Dossier 60*.
- ◇ ⊙ **Porco, C. (2009)**. Le monde tumultueux d'Encelade. Pour la science 376, 26-33.

Extrémophiles

- ⊙ Document riche en iconographie
- ◇ Document de vulgarisation en français

- Asao, M., Jung, D., Achenbach, L., et Madigan, M. (2006)**. Heliorestis convoluta sp. nov., a coiled, alkaliphilic heliobacterium from the Wadi El Natroun, Egypt. *Extremophiles* 10, 403-410.
- Baffico, G. D., Diaz, M. M., Wenzel, M. T., Koschorreck, M., Schimmele, M., Neu, T. R., et Pedrozo, F. (2004)**. Community structure and photosynthetic activity of epilithon from a highly acidic (pH=2) mountain stream in Patagonia, Argentina. *Extremophiles* 8, 463-473.
- Battista, J. R. (1997)**. Against all odds: the survival strategies of Deinococcus radiodurans. *Annu Rev Microbiol* 51, 203-24.
- Blöchl, E., Rachel, R., Burggraf, S., Hafenbradl, D., Jannasch, H. W., et Stetter, K. O. (1997)**. Pyrolobus fumarii, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113°C. *Extremophiles* 1, 14-21.
- ◇ **Bulat, S. A. (2004)**. Des bactéries de sources chaudes dans le lac sous-glaciaire de Vostok. INSU-CNRS. Available at: <http://www.insu.cnrs.fr/a1027,bacteries-sources-chaudes-lac-sous-glaciaire-vostok.html>.
- Bulat, S. A., Alekhina, I. A., Blot, M., Petit, J., de Angelis, M., Wagenbach, D., Lipenkov, V. Y., Vasilyeva, L. P., Wloch, D. M., Raynaud, D., et coll. (2004)**. DNA Signature of Thermophilic Bacteria from the Aged Accretion Ice of Lake Vostok, Antarctica: Implications for Searching for Life in Extreme Icy Environments. *International Journal of Astrobiology* 3, 1-12.
- Chapelle, F. H., O'Neill, K., Bradley, P. M., Methe, B. A., Ciuffo, S. A., Knobel, L. L., et Lovley, D. R. (2002)**. A hydrogen-based subsurface microbial community dominated by methanogens. *Nature* 415, 312-315.

- Cowan, D., Russell, N., Mamais, A., et Sheppard, D. (2002).** Antarctic Dry Valley mineral soils contain unexpectedly high levels of microbial biomass. *Extremophiles* 6, 431-436.
- Csotonyi, J., Swiderski, J., Stackebrandt, E., et Yurkov, V. (2008).** Novel halophilic aerobic anoxygenic phototrophs from a Canadian hypersaline spring system. *Extremophiles* 12, 529-539.
- Donachie, S., Christenson, B., Kunkel, D., Malahoff, A., et Alam, M. (2002).** Microbial community in acidic hydrothermal waters of volcanically active White Island, New Zealand. *Extremophiles* 6, 419-425.
- Edwards, H. G., Vandenabeele, P., Jorge-Villar, S. E., Carter, E. A., Perez, F. R., et Hargreaves, M. D. (2007).** The Rio Tinto Mars Analogue site: An extremophilic Raman spectroscopic study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 68, 1133-1137.
- Hetzer, A., Morgan, H., McDonald, I., et Daughney, C. (2007).** Microbial life in Champagne Pool, a geothermal spring in Waiotapu, New Zealand. *Extremophiles* 11, 605-614.
- López-García, P., Kazmierczak, J., Benzerara, K., Kempe, S., Guyot, F., et Moreira, D. (2005).** Bacterial diversity and carbonate precipitation in the giant microbialites from the highly alkaline Lake Van, Turkey. *Extremophiles* 9, 263-274.
- © **Rothschild, L. J., et Mancinelli, R. L. (2001).** Life in extreme environments. *Nature* 409, 1092-1101. (voir annexe)
- ◆ **Roussel, E. G.** Actualité > Une vie inconnue grouille à 1,5 kilomètre de profondeur. Futura-science. Available at: http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/biologie-1/d/une-vie-inconnue-grouille-a-15-kilometre-de-profondeur_15817/.
- ◆ **Roussel, E. G.** Actualités de l'institut - Découverte d'une biosphère profonde et chaude. CNRS - Institut écologie et environnement. Available at: <http://www.cnrs.fr/inee/communication/breves/erwanroussel.htm>.
- Roussel, E. G., Bonavita, M. C., Querellou, J., Cragg, B. A., Webster, G., Prieur, D., et Parkes, R. J. (2008).** Extending the Sub-Sea-Floor Biosphere. *Science* 320, 1046.
- © **Stetter, K. (2006).** History of discovery of the first hyperthermophiles. *Extremophiles* 10, 357-362. (voir annexe)
- Steven, B., Léveillé, R., Pollard, W., et Whyte, L. (2006).** Microbial ecology and biodiversity in permafrost. *Extremophiles* 10, 259-267.
- Thomas, D. N., et Dieckmann, G. S. (2002).** Antarctic Sea Ice - a Habitat for Extremophiles. *Science* 295, 641-644.
- White, O., Eisen, J. A., Heidelberg, J. F., Hickey, E. K., Peterson, J. D., Dodson, R. J., Haft, D. H., Gwinn, M. L., Nelson, W. C., Richardson, D. L., et coll. (1999).** Genome Sequence of the Radioresistant Bacterium *Deinococcus radiodurans* R1. *Science* 286, 1571-1577.
- Whitman, W. B. (2009).** The Modern Concept of the Prokaryote. *J. Bacteriol.* 191, 2000-2005.
- Woese, C. R., Kandler, O., et Wheelis, M. L. (1990).** Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proc Natl Acad Sci U S A* 87, 4576-4579.

Autres

[Zarka et al., 2008] : P. Zarka, D. Guillaume, **La vie dans l'Univers**, http://media4.obspm.fr/exoplanetes/pages_theme-vie/index.html

[Sillard et al. 2007] : Y. Sillard, J. Patenet, D. Weinstein, J.-C. Ribes, F. Parmentier, J. Arnould, P. Marx, **Phénomènes aérospatiaux non identifiés : un défi à la science**, 2007, Le Cherche Midi

[D'Hedencourt, 2006] : Louis D'Hedencourt, **Un ciel désespérément vide : Faut-il (déjà ?) tirer un bilan de SETI ?**, http://www.exobio.cnrs.fr/spip.php?article73&var_recherche=fermi/

[Norlain et al., 1999] : B. Norlain, J.-J. Velasco, F. Louange, **Les OVNI et la défense : à quoi doit on se préparer ?**, 1999, www.cnes-geipan.fr/documents/Cometa.pdf

[de Mazery, 2008] : P. de Mazery, M. Despratx, **OVNIS : quand l'armée enquête**, 2008, TV Presse, CANAL +

[Beau, 2008] : J. Beau, **R.R.O**, <http://www.rr0.org/>

[Ridpath, 2008] : Ian Ridpath, **The Rendlesham Forest UFO case**, <http://www.ianridpath.com/ufo/rendlesham.htm>

[de Mazery, 2007] : P. de Mazery, M. Despratx, **OVNIS : quand l'armée enquête**, 2007, TV Presse, CANAL +

[Adamski et al.,1953] : George Adamski, Desmond Leslie, **Les soucoupes volantes ont atterri**, 1953

[Campbell & al., 1988], Campbell, B.; Walker, G. A. H.; Yang, S. (1988). "[A search for substellar companions to solar-type stars](https://doi.org/10.1086/166608)". *Astrophysical Journal, Part 1* 331: 902 – 921. doi:10.1086/166608. http://adsbit.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?bibcode=1988ApJ...331..902C.

[Valencia & al., 2007], Valencia, Diana; Dimitar D. Sasselov, Richard J. O'Connell (2007). "Radius and structure models of the first super-earth planet". *The Astrophysical Journal* 656: 545–551. doi:10.1086/509800.

[Fortney & al., 2007], Jonathan J. Fortney and Mark S. Marley and Jason W. Barnes (2007). "Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits".

[Wolszczan & Frail, 1992], Wolszczan, A.; Frail, D. A. (1992). "[A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12](https://doi.org/10.1038/355145a0)". *Nature* 355: 145 – 147. doi:10.1038/355145a0. <http://www.nature.com/nature/journal/v355/n6356/abs/355145a0.html>.

[Struve, 1952], Struve, Otto. "Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work" *The Observatory* Vol. 72 (1952): 199-200.

[Than, 2007], Ker Than (2007-04-24). "Major Discovery: New Planet Could Harbor Water and Life". http://www.space.com/scienceastronomy/070424_hab_exoplanet.html.

[Swain, 2008], Swain, Mark R.; Vasisht, Gautam; Tinetti, Giovanna (2008-03-20). "[The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet](https://doi.org/10.1038/nature06823)". *Nature* 452: 329–331. doi:10.1038/nature06823. <http://www.nature.com/nature/journal/v452/n7185/abs/nature06823.html>. [arXiv.org link](https://arxiv.org/abs/0803.0515)

[Quillen, 2005], Predictions for a planet just inside Fomalhaut's eccentric ring, Alice C. Quillen, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372, #1 (October 2006), pp. L14–L18, doi:10.1111/j.1745-3933.2006.00216.x, Bibcode: 2006MNRAS.372L..14Q.

[Exers, 2003], Exers, Ronald, D. Cullers, J. Billingham, L. Scheffer (editors) (2003). SETI 2020: A Roadmap for the Search for Extraterrestrial Intelligence. SETI Press. ISBN 0-9666335-3-9.

[Donovan & al., 2006], O'Donovan et al. "Rejecting Astrophysical False Positives from the TrES Transiting Planet Survey: The Example of GSC 03885-00829". *The Astrophysical Journal* 644 (2): 1237–1245. doi:10.1086/503740. <http://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/503740>).

Annexes

Liste de documents incontournables

Où est née la vie ?

Pour la science, Dossier n°60, juillet-septembre 2008. Trois grandes parties sont présentées : Sur la Terre, Ailleurs, En laboratoire.

L'exobiologie : de l'origine de la vie à la vie dans l'Univers

Dossier rédigé par André Brack pour Futura-science, janvier 2008

http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/astronomie-1/d/lexobiologie-de-lorigine-de-la-vie-a-la-vie-dans-lunivers_766/c3/221/p1/

CNES : La vie ailleurs ?

Dossier thématique du Centre National d'Etudes Spatiales sur l'exobiologie

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/4641-la-vie-ailleurs-.php>

Vie terrestre ! Vie extraterrestre ?

Dossier sur l'exobiologie réalisé par le CNES pour la Cité des Sciences à l'occasion de l'exposition "Seuls dans l'Univers, de la fiction à la réalité"

http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/expositions/vie-extraterrestre/dossier-cnes-exobiologie/accueil-dossier-cnes.php

Groupement de recherche Exobiologie / Origine de la vie

Le GDR exobiologie regroupe les équipes qui travaillent dans ce domaine au CNRS et au CNES. Le site présente les recherches en cours et affiche les actualités françaises.

<http://www.exobio.cnrs.fr/>

Exobiology in the Solar System and the Search for Life on Mars

Rapport special de l'ESA SP-1231 publié en octobre 1999

<http://www.esa.int/esapub/sp/sp1231/sp1231.pdf>

NASA : Astrobiology

Site officiel de la NASA dédié à l'exobiologie présentant les actualités.

<http://astrobiology.nasa.gov/>

The Astrobiology Web

Site Internet présentant les actualités en exobiologie ainsi que des dossiers de fond.

<http://www.astrobiology.com/>

Documents fournis

Exobiology in the Solar System and the Search for Life on Mars - Rapport spécial de l'ESA SP-1231
publié en octobre 1999

Rothschild, L. J., et Mancinelli, R. L. (2001). Life in extreme environments. *Nature* 409, 1092-1101

Stetter, K. (2006). History of discovery of the first hyperthermophiles. *Extremophiles* 10, 357-362

Forgan, D. (2009). A Numerical Testbed for Hypotheses of Extraterrestrial Life and Intelligence. *International Journal of Astrobiology* *Forthcoming*, 1-11.

Questionnaires du GEIPAN :

CR_aero-club.doc

Formulaire_astronomes.doc

questionnaire_complet.doc

Cosmic_connexion.pdf

message_Evpatoria.pdf

message_Evpatoria_2.pdf