

Vivre dans les étoiles ?

Le 14 février 1990, à la suite d'une demande insistante du scientifique américain Carl Sagan, la NASA commande à la sonde Voyager, qui avait terminé sa mission primaire, de se retourner et de photographier les planètes qu'elle avait visitées : 60 images uniques du système solaire, réunies en une mosaïque connue sous le nom de "Portrait de famille".

Une des images que Voyager renvoya était celle de la Terre à 6,4 milliards de kilomètres, juste « *un point bleu pâle* » dans une photo granuleuse. Elle a été ainsi baptisée du titre d'un livre inspiré par cette photo, écrit en 1994 par Carl Sagan. Le minuscule point est presque perdu dans la lueur du Soleil.

Ce document a pour but de rassembler de manière synthétique les éléments didactiques nécessaires à la conception et à l'animation de la Fête de la Science 2020 consacrée à l'astronomie et l'astrophysique, et plus particulièrement à l'exploration de l'espace. L'idée est de s'adresser à un public généraliste, plutôt jeune.

"Regardez encore ce petit point. C'est ici. C'est notre foyer. C'est nous. Sur lui se trouvent tous ceux que vous aimez, tous ceux que vous connaissez, tous ceux dont vous avez entendu parler, tous les êtres humains qui y ont vécu. Toute la somme de nos joies et de nos souffrances, des milliers de religions aux convictions assurées, d'idéologies et de doctrines économiques, tous les chasseurs et cueilleurs, tous les héros et tous les lâches, tous les créateurs et destructeurs de civilisations, tous les rois et tous les paysans, tous les jeunes couples d'amoureux, tous les pères et mères, tous les enfants plein d'espoir, les inventeurs et les explorateurs, tous les professeurs de morale, tous les politiciens corrompus, toutes les "superstars", tous les "guides suprêmes", tous les saints et pécheurs de l'histoire de notre espèce ont vécu ici, sur ce grain de poussière suspendu dans un rayon de soleil.

La Terre est une toute petite scène dans une vaste arène cosmique." ...

Carl Sagan

Vivre dans les étoiles ?¹

Qui n'a pas un jour rêvé d'aller dans l'espace ? Qui n'a pas imaginé une vie ailleurs ?

Nous avons exploré le système solaire et un peu au-delà. Mais malgré nos premiers pas sur la Lune, nous sommes toujours les habitants de la Terre. L'exploration spatiale a, jusqu'à présent, été dirigée par l'envie de comprendre les origines de l'Univers et de la vie.

Qu'en sera-t-il demain, si nos ressources terrestres s'épuisent, si la démographie n'est pas maîtrisée. Devrons-nous aller vivre ailleurs ? Et dans ce cas où irions-nous ?

1 Comment s'est développé la vie sur Terre

1.1 A l'origine : la naissance du système solaire

Le soleil s'est formé il y a 4,5682 milliards d'années (à 200 000 ans près), par l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse sur elle-même. Il recèle assez d'hydrogène dans son noyau pour que la réaction nucléaire dure encore 7,6 milliards d'années. Comme 7 autres planètes, la Terre primitive naît d'un nuage de poussière entourant la toute jeune étoile.

Pendant plusieurs millions d'années, sous l'effet de la gravitation, les poussières s'agglomèrent en morceaux de roche de plus en plus gros pour finalement donner naissance à une proto planète qui deviendra la Terre.

Entre 40 et 200 millions d'années plus tard, une autre jeune planète nommée Théia entre en collision avec la Terre à la vitesse de 54 000 km/h. De cette collision titanesque et de l'éjection de matière qui en résultera, se formera la Lune à mesure de l'agrégation des débris.

A la suite de cette collision la Terre se refroidit et la croûte terrestre se solidifie. Provenant du dégazage du magma et des volcans, une nouvelle atmosphère se constitue, dominée par l'azote, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et probablement du méthane. L'absence d'oxygène rendrait ce milieu irrespirable pour des êtres tels que nous, et la terre perdit toute son eau liquide.

Entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, une pluie de météorites, de débris de corps glacés (astéroïdes, comètes) issus de la formation du système solaire s'abat sur la Terre lui permettant de constituer l'eau présente dans les océans.

Ce bombardement incessant n'apporte pas que de l'eau. En se décomposant au fond des océans, les météorites libèrent du carbone.

1.2 Et vint la vie

La vie terrestre est basée sur la chimie du carbone et principalement de cinq atomes clés : hydrogène, azote, oxygène, phosphore et soufre. Les molécules simples contenant du carbone comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) présentes sous forme gazeuse dans l'atmosphère, s'assemblent en générant les premières molécules organiques à l'origine de l'apparition et du développement de la vie : des briques élémentaires constituants des premiers organismes vivants.

¹ Le plan du document ainsi que de nombreuses références sont inspirées de Sylvain Chaty (La colonisation de l'espace à l'œil nu, Edition du CNRS, collection "à l'œil nu", 2020)

1.2.1 LUCA (Last Universal Common Ancestor)

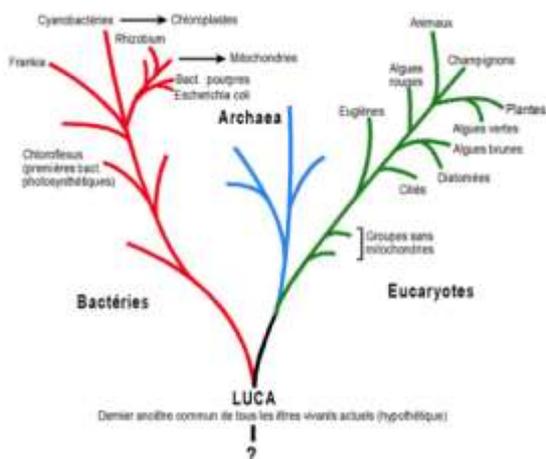
Les êtres vivants s'épanouissent aujourd'hui sur Terre sous des formes tellement variées, qu'il est bon parfois de se rappeler qu'il n'en a pas toujours été ainsi. Pour arriver à une telle diversité, les organismes ont évolué, en suivant des scénarios différents, depuis un ancêtre commun universel, dénommé LUCA.

Mais qui est-il exactement ? Si on considère que les premières cellules, briques de tous les organismes, apparaissent probablement sur Terre il y a entre 3,8 et 3,5 milliards d'années, quelles furent ces premières entités originelles qui allaient donner naissance à LUCA ? La descendance de LUCA fut riche de l'extrême diversité des êtres vivants, mais n'y a-t-il eu qu'un seul LUCA ou plusieurs ?

Les éléments disponibles sur la Terre primitive étaient-ils suffisants pour permettre l'émergence de LUCA ? Il est difficile, (voire impossible) aux chercheurs de créer la vie à partir des éléments constitutifs de la Terre primitive. Les molécules pré-biotiques (acides aminés) ne peuvent pas être constitués sur la Terre. D'où proviennent-elles ? Il reste la possibilité que ces éléments aient été synthétisés dans les nébuleuses interstellaires, véritables réservoirs de gaz et de poussières dont on sait aujourd'hui que plus de 150 molécules y ont été détectées, dont 112 molécules organiques contenant jusqu'à 13 atomes. Certains biologistes pensent qu'il a fallu l'apport de ces molécules au départ de la vie sur la Terre.

1.2.2 Nos lointains ancêtres : les premières structures organiques

C'est dans l'eau froide des fonds marins, qu'issus des roches fracturées, s'échappent des liquides bouillants chauffés par le plasma. Au sein de ce bouillon chimique, différents composants s'assemblent en structures organiques complexes conduisant à la cellule ancestrale avant que sa lignée ne se sépare pour donner naissance aux trois domaines du vivant : les bactéries et les archées, procaryotes² êtres unicellulaires, et les eucaryotes³ auxquels notre genre appartient :



- Les bactéries, dépourvues de noyau, dont les descendants sont aujourd'hui omniprésents, sont les premiers organismes à apparaître dans les profondeurs de l'océan, les plus vieux habitants de la planète.
- Les archées, vraisemblablement issues des bactéries primitives, apparaissent ensuite : souvent considérés comme des archéobactéries de l'extrême, elles seront plus tard les premiers organismes à coloniser les roches nues de la Terre primitive vers 500 millions d'années.
- Les eucaryotes, dont nous êtres humains, animaux, végétaux, et champignons faisons partie.

Et progressivement la vie s'étendit à la planète en se diversifiant. Mais la vie sur Terre ne fut pas un long fleuve tranquille.

² Un procaryote est un organisme (bactérie) unicellulaire qui ne possède pas de noyau.

³ Le terme eucaryote désigne l'ensemble des organismes unicellulaires ou multicellulaires dont les cellules dites "eucaryotes" possèdent un noyau et des structures spécialisées (organites) délimitées par des membranes.

1.3 Apparition, disparition, renouveau

Au cours des 500 derniers millions d'années, cinq extinctions d'intensités différentes ont fait disparaître 75% des espèces animales et végétales :

- -444 millions d'années : 85% des espèces essentiellement marines à cette époque ont disparues pour n'avoir pas pu s'adapter à la glaciation entraînant la baisse du niveau des océans.
- -365 millions d'années : 75% des espèces sont détruites, vraisemblablement à cause d'une autre glaciation.
- -252 millions d'année : 75% de la faune et de la flore, 96% des espèces marines sont décimées en 100 000 ans à cause d'éruptions volcaniques massives.
- -200 millions d'années : 20% des espèces marines, la plupart des reptiles, oiseaux et amphibiens soit au total la moitié de la biodiversité terrestre, sont détruites concomitamment au morcellement de la Pangée⁴ due à des éruptions volcaniques massives durant 600 000 ans.
- -65 millions d'années : collision à la vitesse de 50 000 km/h d'une gigantesque météorite de 10 km de diamètre. L'impact, d'une violence inouïe, aurait soufflé des régions entières, créant un immense raz de marée et projetant dans l'atmosphère suffisamment de poussières pour obscurcir le sol durant des mois. Incapables de vivre sans soleil, de nombreuses plantes auraient fini par mourir, suivies par les herbivores puis les carnivores. Près de 80% des espèces végétales et animales, dont les dinosaures non aviens⁵, auraient ainsi disparu définitivement de la Terre.

1.4 Pourquoi la vie est-elle apparue sur Terre ?

La présence de la vie sur Terre depuis près de 4 milliards d'années, son expansion à l'ensemble de la planète, les conditions environnementales variables dans l'espace et dans le temps conduisent à penser que ce modèle de développement est peut-être le seul ayant réussi dans le système solaire.

Des conditions exceptionnelles ont favorisé l'apparition de la vie sur Terre et son développement. Elles sont un guide pour la recherche de vies extraterrestres ou de planètes dont les caractéristiques permettraient l'installation et le développement de groupes humains.

Pour la Terre les conditions favorables sont :

- La distance au Soleil permettant un milieu relativement tempéré.
- La surface rocheuse entourée d'atmosphère et d'eau liquide.
- La taille : trop petite elle ne garderait pas l'atmosphère, trop grosse elle resterait gazeuse.
- L'activité tectonique des plaques.
- La présence de la Lune, qui en régule le mouvement.
- L'impact de micrométéorites et l'apport incessant de molécules organiques.
- Le champ magnétique qui protège du vent solaire.

2 Pourquoi quitter la Terre

2.1 Le surpeuplement

Selon l'ONU, la population mondiale devrait dépasser les 9 milliards d'individus en 2050 (7 milliards aujourd'hui), soit un accroissement de la pression sur les ressources naturelles de la Terre de 30%, sans compter l'augmentation de la demande résultant de l'amélioration des niveaux de vie dans diverses

⁴ La Pangée désigne le continent unique qui était autrefois formé des six continents actuels de la Terre. Il a aujourd'hui disparu. Il existait à l'époque il y a environ 240 millions d'années. Les dinosaures pouvaient donc aller à pied sec sur toute la surface des terres émergées et s'y sont dispersés.

⁵ Relatif aux oiseaux.

parties du monde en voie de développement. Aujourd'hui il est très difficile de déterminer le nombre d'individus que la Terre peut supporter et quand la population aura atteint son effectif maximum.

Plusieurs facteurs peuvent repousser cette échéance voire la rapprocher. S'il ne fait aucun doute que la technologie a permis à l'humanité de s'accroître depuis les années 1830 sans les famines universelles que prévoyaient les experts au début du 20^{ème} siècle, on peut penser que l'ingéniosité humaine continuera d'augmenter la disponibilité des ressources naturelles en rendant arables certaines zones, en maximisant le rendement de celles existantes et en explorant le fond des océans.

Cependant, l'augmentation croissante de la population n'est pas le seul défi à relever. L'homme doit faire face à un changement climatique et à une activité humaine qui contribuent à la détérioration rapide de certaines des ressources naturelles.

Pour la Terre, les conséquences conduisent à une modification continue et difficilement maîtrisable de l'environnement :

- Épuisement des ressources naturelles connues, particulièrement les combustibles fossiles.
- Niveaux accrus de pollution de l'air, de l'eau, des sols.
- Déforestation et dégradation d'écosystèmes qui maintiennent l'équilibre global atmosphérique en oxygène et dioxyde de carbone ; environ 8 millions d'hectares de forêts sont perdus chaque année.
- Pertes de terres arables souvent irréversibles et extension de la désertification.
- Multiplication des catastrophes naturelles et accroissement de leurs conséquences : les catastrophes naturelles ne sont pas toutes liées à la surpopulation ; par exemple, les séismes et tsunamis en sont complètement indépendants, contrairement aux cyclones qui sont liés aux phénomènes climatiques, donc à la surpopulation. Mais dans tous les cas, l'ampleur des dégâts est considérablement accrue par la surpopulation.
- Extinction massive des espèces due à la restriction et à la modification de leurs aires de vie, et à une disparition des écosystèmes.

Pour l'être humain, il en résulte un certain nombre de problèmes parmi lesquels :

- La pénurie d'eau potable, et sa conséquence directe : l'évacuation et le traitement des eaux usées.
- L'émergence accrue d'épidémie et de pandémies liés à la promiscuité (fortes densités de population) et à la proximité d'espèces animales.

et leurs conséquences sociales : malnutrition voire retour des famines, dégradation des conditions d'hygiène, baisse de l'espérance de vie, conflits pour le partage des ressources, augmentation de la criminalité dopée par les trafics, etc. ...

2.2 L'anthropocène

Le terme de chronologie géologique « Anthropocène » signifie littéralement "l'âge de l'Homme". Il a été employé initialement par des chercheurs soviétiques au début des années 1960, puis théorisé par Paul Josef Crutzen, prix Nobel de Chimie en 1995. Depuis, l'idée a fait son chemin jusqu'à la reconnaissance officielle, le 29 août 2016, par un groupe international d'experts réunis au Congrès géologique international du Cap (Afrique du Sud) :

« L'Homme est devenu une force telle qu'il modifie la planète », y a déclaré Catherine Jeandel⁶, directrice de recherche au CNRS.

Les activités humaines sont en train de laisser une empreinte profonde dans les couches géologiques. L'impact de l'homme sur l'environnement dure depuis des siècles voire des millénaires. Quand l'Anthropocène a-t-il vraiment commencé ? Depuis quand notre espèce est-elle devenue une force en mesure de modifier sensiblement l'évolution de la Planète ? Plusieurs marqueurs sont évoqués, proches de nous :

- En 1962, quand s'accélère l'exploitation intensive du charbon et du pétrole et l'utilisation massive des engrais chimiques et de nouveaux matériaux (céramiques, plastiques, ciments) ?
- En 1945, lors de l'utilisation des premières bombes atomiques marquant durablement les sédiments et roches de radionucléides ?
- En 1809, au début de la révolution industrielle marquant l'accroissement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ?
- En 1784, date du brevet de la première machine à vapeur de James Watt ?

Ou plus éloignés :

- Au néolithique, lors de la sédentarisation de l'homme ?
- Il y a 100 000 ans lors de la domestication du feu ?

A ce stade de connaissance, laissons la science en décider ; mais " Adieu donc à notre aire géologique actuelle, l'Holocène".

2.3 Et nous ne sommes pas à l'abri d'un astéroïde !

Il y a 65 millions d'années la collision avec un astéroïde a engendré la 5^{ème} extinction (voir ci-dessus).

Un épisode semblable est-il de nouveau possible ? L'homme y a réfléchi et instauré l'échelle de Turin : c'est une méthode servant à catégoriser les risques d'impacts d'objets géocroiseurs, tels les astéroïdes ou les comètes. Graduée de 0 (aucune chance de collision) à 10 (collision certaine entraînant une catastrophe climatique globale), elle est destinée à donner une indication simple des estimations de la gravité d'une collision, en combinant les probabilités d'impact et le potentiel destructeur, en une seule valeur. La plupart des géocroiseurs (astéroïdes évoluant à proximité de la Terre) proviennent d'une ceinture d'astéroïdes située entre la planète Mars et la planète Jupiter, sans doute issus d'une planète qui n'a pu se former ou qui a été éjectée à cause de la trop forte gravité de Jupiter.

Le météore de Tcheliabinsk a été observé dans le ciel du sud de l'Oural, au-dessus de l'oblast de Tcheliabinsk, le matin du 15 février 2013 à environ 9 h 20 locales (3 h 20 UTC).



D'un diamètre de 15 à 17 m et d'une masse estimée de 7 000 à 10 000 tonnes, le bolide s'est fragmenté dans l'atmosphère, entre 40 et 20 kilomètres d'altitude. Le phénomène a libéré une énergie estimée à 440 kilotonnes de TNT (environ 30 fois l'énergie de la bombe de Hiroshima), créant une onde de choc qui a fait tomber un mur et un toit d'usine, détruit des milliers de vitres et de fenêtres de la région, et blessé ainsi près d'un millier de personnes,

⁶ Catherine Jeandel est une océanologue géochimiste française. Directrice de recherche au CNRS, elle travaille au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS), où elle étudie la géochimie marine pour comprendre les changements liés à l'activité humaine. Elle s'intéresse en particulier aux interactions continents-océans.

principalement à Tcheliabinsk. Des fragments de l'objet ont créé des cratères d'impact près de Tchekbarkoul et Zlatoust.

Surpopulation, modifications environnementales, réchauffement, pollutions, extinctions d'espèces, menaces sur la biodiversité, météorites, Homo sapiens saura-t-il adapter sa population et sa consommation à ses ressources terrestres pour rester sur Terre de manière durable ? Ou sera-t-il obligé de quitter notre planète et d'apprendre à vivre sur un autre astre ?

Petite tache bleue solitaire dans la grande nuit cosmique, aucun signe ne nous permet de penser qu'une aide nous viendra d'ailleurs.

3 Où partir ?

Ça y est, nous partons, mais où ? Existe-t-il dans le système solaire des planètes accessibles et similaires en taille à la Terre⁷.

3.1 La proche banlieue : les planètes telluriques

3.1.1.1 Mercure

Mercure, dieu du commerce et des voyages, messenger des dieux dans la mythologie romaine (Hermès dans la mythologie grecque), a donné son nom à cette planète ainsi nommée à cause de la vitesse à laquelle elle se déplace dans le ciel.

Mercure est la planète la plus proche du Soleil, la plus petite, et ressemble beaucoup à la Lune. Son atmosphère est presque inexistante. Ainsi, elle présente des conditions infernales de température variant de -150°C à $+450^{\circ}\text{C}$. Au fond de ses cratères gelés (-200°C), on trouve de l'eau. Mais bien sûr il n'existe aucune trace d'eau liquide. Sa densité est étonnamment forte, et les astronomes pensent que Mercure contiendrait un noyau de fer très volumineux.

Mercure ne possède pas de satellites. Elle a le temps de tourner sur elle-même lorsqu'elle parcourt les deux tiers de son orbite autour du Soleil. Cela implique qu'on voit le Soleil se lever et se coucher en... 176 jours ! Elle possède un champ magnétique équivalent à 1 % de celui de la Terre mais 100 fois plus puissant que Mars !

La prochaine mission BepiColombo⁸ (European Space Agency (ESA) et Agence Spatiale Japonaise, (JAXA)) lancée en 2018 (arrivée prévue en 2025) permettra sans doute d'en savoir plus sur cette planète très chaude, entourée d'une mince atmosphère que la proximité du Soleil rend peu attractive pour la vie.

3.1.1.2 Venus

Vénus est chez les grecs la déesse de l'amour et de la beauté. Comme Venus était la planète la plus brillante⁹ des planètes connues à l'époque, les anciens astronomes la prénommèrent Venus.

Vénus est la deuxième planète du système solaire. Elle ressemble beaucoup à la Terre sur le plan de la taille et de la composition chimique de l'atmosphère. Elle pourrait presque être la sœur jumelle de notre planète, si elle n'avait mal tourné. Malgré son nom de déesse de l'amour, Venus est en fait un enfer brûlant où la température moyenne est de 460°C . En cause, le terrible effet de serre qu'elle subit, dû à la composition majoritaire de son atmosphère en gaz carbonique.

⁷ <http://www.univers-astronomie.fr/>

⁸ Voir par exemple : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/bepicolombo-bepicolombo-3632/>.

⁹ Les nuages d'altitude (30 – 70 km) qui l'entourent, réfléchissent presque entièrement la lumière du Soleil.

Venus tourne dans le sens rétrograde, en plus de jours qu'il ne lui en faut pour tourner autour du Soleil (le jour vénusien dure 243 jours terrestres). Les astronomes pensent que ce pourrait être un astéroïde très massif qui l'aurait percuté et fait changer de sens de rotation. Elle ne possède aucun satellite. Sa pression atmosphérique est équivalente à la pression qu'il y aurait si on était sous l'eau à 1 000 m de profondeur soit 94 bars ! Son atmosphère est des milliers de fois plus dense que celle de la Terre, mais celle-ci est presque immobile. Lors des tempêtes, les vents n'excèdent pas les 10 km/h.

Malgré sa jolie apparence, Venus est un enfer invivable, qui n'est pas vraiment le cible pour le développement humain. Par contre, la mieux connaitre est fondamentale pour comprendre comment, possédant initialement les ingrédients nécessaires à la vie, elle a pu se transformer en un enfer chaud, acide et sec, victime d'un effet de serre divergent.

3.1.1.3 Mars¹⁰

Les différentes missions martiennes ont permis de mieux connaître Mars. Et l'environnement n'y est pas tellement accueillant pour l'Homme ! Pourtant ! ...

Mars, la planète rouge, quatrième planète du système solaire, est connue depuis l'Antiquité. Sa couleur rouge est sans doute à l'origine de son nom, celui du Dieu romain de la guerre. Elle tourne sur elle-même en un peu plus d'un jour terrestre, et l'année martienne est de 686 jours. Son atmosphère est principalement composée de dioxyde de carbone, d'azote et d'argon. La pression au niveau du sol est en moyenne 170 fois plus faible que sur Terre, et présente une extrême variabilité. Sa pesanteur est plus faible (3.71 m/s²). Son champ magnétique est nul.

L'eau est présente sur Mars, un peu dans l'atmosphère sous forme de vapeur (0.03 %), mais aussi dans certaines des roches cristallines qui composent sa surface (comme le gypse), et dans les calottes glaciaires.

Le noyau de la planète est principalement composé d'un alliage de fer et de nickel à 2 000°C. Son manteau contient des minéraux riches en fer et en magnésium, et sa croûte est composée de roches cristallines. La couleur rouge de la planète est due aux oxydes de fer (rouille) présents en surface.

L'orbite de Mars, considérablement elliptique, induit des différences de températures d'environ 70° C entre l'aphélie (point de l'orbite d'une planète où elle se trouve à la plus grande distance du Soleil), et le périhélie (point de l'orbite où elle est la plus proche). Alors que la température moyenne de Mars est de -60° C, les températures peuvent varier de -130° en hiver à -3° C en été, avec des écarts importants entre les pôles nord et sud.

Mars faisant partie des cinq planètes visibles à l'œil nu (avec Mercure, Vénus, Jupiter, et Saturne), elle est observée depuis que les hommes regardent le ciel nocturne. Lors de ses oppositions, elle est la planète la plus brillante après Vénus. Elle est observée depuis l'Antiquité, mais de ces observations de l'astronomie pré-télescopique, il ne reste que peu de documents, souvent teintés de religion ou d'astrologie.

La croyance en l'existence des canaux martiens du 19^{ème} siècle au début du 20^{ème} marqua l'imagination populaire, contribuant au mythe de l'existence d'une vie intelligente sur la quatrième planète du système solaire. Leur observation, qui n'a jamais fait l'unanimité, provenait d'une illusion d'optique, phénomène fréquent dans les conditions d'observation de l'époque.

¹⁰ En 2017, nous avons consacré la Fête de la Science au Voyage sur Mars. Voir tous les détail à l'adresse : https://4d168bdf-f5e8-4725-8121-4e226e67a76e.filesusr.com/ugd/cfc007_e92eb7129ad74f7fad9a49a20bcc3e2d.pdf

Les canaux de Mars sont largement évoqués dans la littérature de science-fiction depuis La Guerre des mondes de H. G. Wells (1898), pour décrire une imaginaire civilisation extraterrestre sur une « planète mourante », condamnée par le dessèchement de son climat, ce qui inspira aux auteurs, d'Edgar Rice Burroughs à Philip K. Dick, des réflexions souvent pessimistes sur le devenir des civilisations ; à l'inverse, un courant récent de la science-fiction, illustré notamment par Kim Stanley Robinson, envisage les canaux comme un projet d'avenir dans un programme de terraformation de Mars.

Bien que la planète soit inhospitalière, les récentes missions martiennes ont apporté des résultats intéressants :

- De la glace d'eau est encore présente dans le sous-sol martien (gypse et sels hydratés).
- Du méthane a été détecté dans l'atmosphère. Cette molécule est détruite par le rayonnement ultraviolet. Sa durée de vie est de l'ordre de 300 ans. Sa détection suggère l'existence d'une source permanente propre à renouveler sa présence : Mars serait-elle bel et bien active ? Deux origines sont possibles : géologique (volcans, sources géothermiques, processus photochimiques ou géochimiques) ou biologique (bactéries méthanogènes vivant sous la surface martiennes). C'est dans le but de confirmer cette présence de méthane que la mission TGA (ESA) orbite actuellement autour de Mars, et ce jusqu'en 2020.
- Il y a 4 milliards d'années, au moment où se constituait la Terre, Mars a abrité de grandes quantités d'eau liquide s'écoulant en permanence et en abondance sous forme de pluie, rivières et mers de surface. A cette époque lointaine le climat était plus tempéré, et des micro-météorites apportaient des molécules pré-biotiques.

Les conditions favorables à l'émergence de la vie étaient toutes réunies. Mais le destin de Mars a divergé de celui de la Terre. La diminution constante de son magnétisme pendant des millions d'années, a permis aux vents solaires et au rayonnement UV de dégrader l'atmosphère suffisamment pour entraîner un bouleversement du climat martien. Les chercheurs estiment en effet que ces éruptions solaires étaient plus fréquentes lors de la formation du système solaire et des planètes comme Mars, il y a 4 à 4,5 milliards d'années¹¹. La perte d'une grande partie de l'atmosphère a probablement facilité le passage de Mars, planète alors analogue à la Terre et propice au vivant avec ses rivières et ses lacs, à un grand désert aride.

	Caractéristiques	Mercure	Vénus	Terre	Mars
O r b i t e	1/2 grand axe (km)	5,79E+07	1,08E+08	1,50E+08	2,28E+07
	Aphélie (km)	6,98E+07	1,09E+08	1,52E+08	2,49E+08
	Périphélie (km)	4,60E+07	1,07E+05	1,47E+08	2,07E+08
	Période de révolution (jour)	87,60	224,60	365,25	686,9 (1,88 a)
P h y s i q u e	Vitesse moyenne orbitale (km/s)	47,36	35,03	29,78	24,08
	Satellite	0	0	1	2
	Rayon (km)	2,44E+03	6,05E+03	6,38E+03	3,40E+03
	Volume (km ³)	6,083E10 (0,055T)	9,284E11 (0,86T)	1,08E+12	1.63E11 (0,15 Terre)
	Masse (kg)	3,30E+23	4,86E+24	5,97E+24	6,18E+23
	Masse volumique (kg/m ³)	5427	5204	5515	3933
	Gravité (m/s ²)	3,7 (0,378 g)	8,87 (0,905 g)	9,81 (1 g)	3,71 (0,38 g)
	Vitesse de libération (km/s)	4,25	10,46	11,18	5,03
	Période de rotation (j)	58,645	-243,023	1	1,025
	Température moyenne (°C)	167 (427 ; -183)	462 (446 ; 490)	15 (56,7 ; -92,2)	-63 (20 ; -143)
	Pression atmosphérique (Pa)	5,00E-10	9,30E+06	1,01E+05	6,10E+02
	Composition	quasi inexistante	CO ₂ 96%	N (78%) O (20,1%)	CO ₂ 96%
Champ magnétique (nT)	200 (65% Terre)	0	307	0	

¹¹ <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/nasa-atmosphere-mars-sonde-maven-raconte-son-histoire-60382/>

3.2 Au-delà de Mars

Jusqu'aux confins du système solaire, existe-t-il des terres utiles, dont on pourrait utiliser les ressources, ou habitables : ceinture d'astéroïdes, planètes géantes et leurs satellites glacés, comètes froides et poreuses.

3.2.1 La ceinture d'astéroïdes

Les astéroïdes ne sont pas considérés comme des lieux habitables possibles. En revanche, ils s'avèrent indispensables comme bases d'extraction de matériaux qui pourraient être nécessaires pour alimenter en carburant les véhicules d'exploration du système solaire (fusées, sondes, navettes, robots).

Ainsi la caractérisation de la composition des astéroïdes est l'une des motivations des agences spatiales pour développer des missions vers ces petits corps du système solaire :

- Near (NASA, lancée en 1996), atterrit sur Eros (2001), Hayabusa-1 (JAXA¹², lancée en 2003) ramène en 2010 plusieurs milliers de grains de poussière d'Itokawa
- Dawn (NASA, lancée en 2007), explore Vesta, le 2^{ème} plus gros corps de la ceinture (2011), puis Cérès, la planète naine, $\frac{1}{3}$ de la masse totale de la ceinture, le plus gros corps, (2015).
- Hayabusa-2 (lancée en 2014), récupère un échantillon de poussière de Ryugu (900 m de large, 2019).
- Osiris-Rex (NASA, 2016), atteint Bennu, présent dès les origines du système solaire, et projetée de ramener sur Terre en 2023 quelques centaines de grammes de poussière, afin de déterminer si ce sont bien ces astéroïdes carbonés qui ont apporté l'eau et les molécules organiques lors de collisions avec notre planète.
- Psyche (lancement 2022) visitera un astéroïde métallique (fer et nickel).

Notons que la durée des missions s'exprime en années. Les principales caractéristiques des astéroïdes explorés sont les suivantes :

- Eros et Itokawa : présence d'eau, et de régolithe (couche de poussière résultant du bombardement météoritique sur des objets dénués d'atmosphère).
- Cérès : présence de sels et minéraux hydratés, glace d'eau, molécules organiques complexes ; un environnement propice à l'apparition d'une vie primitive.
- Ryugu, plus noir que l'ébène, est constellé de rochers ; à peine plus dense que l'eau.
- Bennu est riche en carbone, et présente une chance sur 2 500 de heurter la Terre dans les prochains milliers d'années.

3.2.2 Les planètes géantes

Circulant relativement à l'écart du Soleil, et marquant la partie interne de la région froide du système solaire, les quatre planètes géantes renferment la majeure partie de la masse de notre système planétaire : elles sont, par ordre de distance croissante au Soleil : Jupiter (71% de la masse totale des objets qui tournent autour du Soleil), Saturne, caractérisée par ses anneaux brillants est légèrement plus petite. Assez similaires, Uranus et Neptune, deux objets plus lointains et discrets, sont de masses encore un peu inférieures. Il s'agit d'objets de grandes dimensions principalement gazeux.

Elles sont composées de matières similaires à celles du Soleil, autour d'un hypothétique cœur de fer, de silicates et de glace. Aucune de ces planètes n'est considérée comme cible pour le développement de la vie.

¹² Agence Japonaise

En revanche, certains de leurs satellites constituent des cibles prioritaires d'exploration du système solaire.

3.2.2.1 *Europe, satellite de Jupiter*

Découvert par Galilée, Europe est un satellite naturel de Jupiter, le sixième par la distance et le deuxième parmi les satellites galiléens. Les sondes Voyager (NASA, lancée en 1979), puis Galiléo (NASA, lancée en 1989), ont permis de mieux connaître ce satellite.

Avec un diamètre de 3 121 kilomètres, Europe est le quatrième plus gros satellite de Jupiter et le sixième du système solaire. Sa surface est composée de glace et se trouve être la plus lisse de tout le système solaire. Bien que sa température soit au maximum de -150 °C , on suppose qu'en-dessous se trouve un océan liquide sous glaciaire d'environ 100 kilomètres de profondeur entourant un noyau solide rocheux. La chaleur nécessaire au maintien de l'eau à l'état liquide est fournie par les forces intenses des marées internes créées par la proximité de Jupiter. De plus, des geysers d'eau ont été détectés à sa surface. Ces éléments laissent à penser qu'Europe pourrait être habitable par certains organismes, bien que cette hypothèse ne soit pas encore vérifiée. À ce sujet, la NASA et l'ESA projettent de lancer chacune une mission (Europa en 2022, Juice 2023, mises en orbite autour de Jupiter à partir de 2028 - 2029) afin d'étudier en détail Europe.

3.2.2.2 *Encelade et Titan, satellites de Saturne*

Encelade est un satellite naturel de la planète Saturne, découvert par William Herschel en 1789. Il s'agit du sixième satellite de Saturne par la taille, et du quatorzième par son éloignement.

Depuis la mission Voyager-2, et surtout la mission Cassini-Huygens, arrivée en orbite saturnienne en 2004, Encelade est réputé pour posséder plusieurs caractéristiques étonnantes, dont une géologie très complexe jusque-là insoupçonnée, et une activité qui reste toujours actuellement difficile à expliquer, pour un corps de si petite taille (500 km de diamètre en moyenne). La sonde Cassini a d'ailleurs observé à sa surface des jets de matière qui pourraient être semblables à des geysers composés « d'une sorte d'eau carbonique mélangée à une essence de gaz naturel », et qui semblent indiquer la présence d'eau liquide sous la surface. De récentes observations ont permis de confirmer cette hypothèse, en démontrant la présence d'un océan d'eau liquide sous sa surface. Les trois ingrédients de la vie (chaleur, eau, molécules organiques) seraient donc potentiellement présents sur Encelade.

Encelade est recouvert d'une couche aux reflets bleutés, caractéristique de la neige d'eau fraîche. La neige serait épaisse d'une centaine de mètres, ce qui indique qu'il neige sur Encelade depuis au moins 100 millions d'années. Les geysers, constitués de microparticules de cristaux glacés, de givre, de vapeur d'eau, de sel, de particules organiques et d'hydrocarbures complexes et la source de chaleur souterraine qui les alimente, seraient donc actifs depuis très longtemps et proviendraient de l'océan interne d'environ 45 km d'épaisseur situé sous la couche de glace, dont l'épaisseur varie de 35 km à l'équateur à 2 km au pôle sud.

De l'énergie, de l'eau liquide chauffée à au moins 90 °C , des molécules organiques et un environnement chimique hors équilibre : tous les ingrédients nécessaires à l'émergence de la vie sont réunis dans l'océan d'Encelade.

Titan est le plus grand satellite naturel de Saturne. Avec un diamètre 6 % plus grand que celui de Mercure, Titan est par la taille au deuxième rang des satellites du système solaire. Il s'agit du seul satellite connu à posséder une atmosphère dense. Découvert par l'astronome néerlandais Christian Huygens en 1655, Titan est la première lune observée autour de Saturne.

Titan est principalement composé de roche et d'eau gelée. Son épaisse atmosphère a longtemps empêché l'observation de sa surface, jusqu'à l'arrivée de la mission Cassini-Huygens en 2004. Cette dernière a permis la découverte de lacs d'hydrocarbures liquides dans les régions polaires du satellite. Du point de vue géologique, la surface de Titan est jeune ; quelques montagnes ainsi que des cryo-volcans (volcans de glace) éventuels y sont répertoriés, mais cette surface demeure relativement plate et lisse, avec peu de cratères d'impacts observés.

L'atmosphère de Titan est composée à 98,4 % de diazote et à 1,6 % de méthane et d'éthane. Le climat — qui comprend des vents et de la pluie de méthane — crée sur la surface des caractéristiques similaires à celles rencontrées sur Terre, telles des dunes et des côtes. Comme la Terre, Titan présente des saisons. Avec ses liquides (à la fois à la surface et sous la surface) et son épaisse atmosphère de diazote, Titan est perçu comme un analogue de la Terre primitive, mais à une température beaucoup plus basse. Le satellite est cité comme un possible hôte de vie extraterrestre microbienne ou, au moins, comme un environnement prébiotique riche en chimie organique complexe. Certains chercheurs suggèrent qu'un possible océan souterrain pourrait servir d'environnement favorable à la vie.

En résumé, des satellites de Jupiter (Europe, Ganymède, Callisto) et de Neptune (Encelade, Titan, Dione), dissimulent sous leurs surfaces glacées des océans d'eau liquide en contact direct avec leurs noyaux rocheux et dispersent dans leurs atmosphères des geysers d'eau salée. L'équivalent sur Terre est le lac glaciaire antarctique Volstock¹³ dont l'existence est prouvée depuis au moins 1,5 million d'années, contenant une flore et une faune isolée de l'extérieur depuis probablement 100 000 ans.

Les échantillons d'eau prélevés directement dans le lac Volstock indiquent la présence d'une espèce vivante jamais identifiée. Des analyses ont été effectuées au Laboratory of Eukaryote Genetics du Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI). L'espèce bactérienne trouvée n'appartient à aucun des quelques 40 embranchements (phylums) répertoriés sur Terre. « Après avoir exclu tous les contaminants connus, les chercheurs ont découvert que l'ADN bactérien ne correspond à aucune des espèces connues répertoriées dans les banques de données mondiales. Nous appelons cela de la vie non identifiée et non classifiée », a déclaré Sergei Bulat, chercheur en charge de l'analyse des échantillons¹⁴. Les scientifiques n'ont pas réussi à dresser un arbre phylogénétique du micro-organisme. Cet arbre permet de déterminer le lien entre son évolution et celles d'autres espèces. Ils ont ainsi montré que la bactérie ne rentre dans aucun phylum connu.

Dans les océans des satellites de Jupiter et de Neptune, les conditions semblent être réunies pour permettre l'apparition ou même l'existence d'une vie microbienne : recelant vraisemblablement bien des secrets, ces satellites sont une cible prioritaire des explorations spatiales.

3.2.3 Les comètes

Les comètes sont des résidus de la nébuleuse solaire, formées pendant les premiers millions d'années du système solaire.

Ce sont de petits corps célestes constitués d'un noyau de glace et de poussière (70% de vide) en orbite autour d'une étoile. Lorsque l'orbite d'une comète, qui a généralement la forme d'une ellipse très allongée, l'amène près de cette étoile (par exemple le Soleil dans le système solaire), elle est exposée à

¹³ Le lac Vostok est le plus grand des lacs subglaciaires de l'Antarctique. Il se situe en dessous de la station russe de Vostok, dont la surface de l'inlandsis se situe à cet endroit à 3 488 m d'altitude. La surface de ce lac d'eau douce est à approximativement 4 000 m en dessous de la surface de la glace, ce qui la place à approximativement 500 m en dessous du niveau de la mer. L'eau du lac sans doute isolée de tout contact avec l'extérieur depuis des millions d'années, en ferait une structure fossile tout à fait remarquable.

¹⁴ <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/oceanographie-bacteries-inconnues-decouvertes-lac-vostok-45097/>

diverses forces émanant de cette dernière : vent stellaire, pression de radiation et gravitation. Le noyau s'entoure alors d'une sorte de fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure, souvent prolongée de deux traînées lumineuses composées également de gaz et de poussières, les queues (une de gaz ionisé et une de poussières), qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de millions de kilomètres.

Dans le système solaire, quand elles s'approchent suffisamment de la Terre ou que leur magnitude est importante, les comètes deviennent visibles à l'œil nu (parfois même de jour) et peuvent être spectaculaires ; elles sont alors classées comme « grandes comètes ».

Les comètes se distinguent des astéroïdes, autres petits corps, par l'activité de leur noyau. Cependant, les observations récentes de plusieurs astéroïdes présentant une activité cométaire, notamment dans la ceinture principale, tendent à rendre de plus en plus floue la distinction entre comètes et astéroïdes. Elles proviendraient de deux réservoirs principaux du système solaire, la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort, tandis que les comètes interstellaires ont une origine extérieure au système solaire.

La comète de Halley est la plus connue de toutes les comètes. Son demi grand axe est d'environ 2,7 milliards de kilomètres et sa période est de 76 ans. Elle est mentionnée dès -611 en Chine. Survolée à plusieurs reprises par des sondes, - Vega 1 et 2 (Roscosmos, URSS, lancée en 1984), Giotto (ESA, lancée en 1985), Suisei et Sakigate (JAXA, lancée en 1985) – on la connaît mieux depuis que la sonde Giotto qui avait pour mission d'aller photographier son noyau, en a sondé le cœur. Giotto s'est approchée à 600 km du noyau en forme de cacahuète d'une dimension de $16 \times 8 \times 7$ km ; elle a pu y voir deux gros geysers de gaz qui alimentaient la chevelure et la queue. C'était la première fois qu'une sonde spatiale s'approchait d'une comète mais depuis, la sonde Rosetta (ESA, lancée en 2004) a fait mieux en envoyant un atterrisseur se poser sur la comète Tchourioumov-Guérassimenko ("Tchoury") en 2014.



D'autres observations de comètes ont aussi eu lieu : Stardust (NASA, lancée en 1999) a frôlé la comète 81P/Wild-2, Deep Impact (NASA, lancée en 2005) a percuté Temple-1.

Rosetta, après 10 ans de voyage et 5 milliards de km parcourus, atteint Tchoury (mai 2014), se place en orbite autour (4 km de large, 66000 km/h) et la cartographie pendant 6 mois. En novembre 2014, Rosetta largue et dépose Philae sur la surface dans le but de l'analyser.

Toutes les observations et études ont montré que les comètes sont riches en eau et en matières organiques, ingrédients cruciaux de la soupe pré-biotique nécessaires à l'émergence de la vie primitive. Elles ont pu comme les astéroïdes ensemençer la Terre et constituent des réservoirs idéaux pour alimenter les futurs vaisseaux d'exploration du système solaire.

3.3 De la course à la lune

L'importance naturelle de la Lune dans le ciel terrestre et son cycle régulier de phases, vu depuis la Terre, ont fourni des références et des influences culturelles aux sociétés et cultures humaines depuis des temps immémoriaux. Ces influences culturelles se retrouvent dans la langue, les systèmes de calendrier lunaire, l'art et la mythologie.

De Cyrano de Bergerac¹⁵ à Jules Verne¹⁶, de Méliès¹⁷ à Tintin¹⁸, la lune nous fascine et nous provoque : viens-y !

L'exploration lunaire, surtout depuis le programme Apollo, a concrétisé le rêve, malgré les images d'humains lourdement équipés et entravés dans leurs lourdes combinaisons, se déplaçant sur un fond noir dans un monde froid et hostile.

Les vols de Spounik-1&2 ont ébranlé le Monde et initié une course à l'espace entre les deux superpuissances mondiales du moment, l'URSS et les USA. Dopée par la rivalité est-ouest, la guerre froide, l'exploration lunaire a atteint son apogée en 1969 lors des premiers pas d'Armstrong à la surface. Ce n'est qu'en 1979, avec le premier vol d'Ariane que s'est concrétisée l'internationalisation de la course à l'espace. Depuis 1972, il n'y a plus d'exploration de l'espace à l'aide de vols habités. Avec le développement des sondes automatiques, des robots d'exploration, il n'y a plus vraiment d'intérêt scientifique à envoyer des êtres humains dans l'espace, vu le coût que cela représente.

Dans les années suivantes l'intérêt pour l'exploration lunaire faiblit, et les efforts se concentrent sur les missions habitées en orbite basse terrestre : Mir (Paix, en Russe) puis l'ISS (Station Spatiale Internationale).

L'engagement de la Chine, puissance spatiale en développement depuis 2003, son lanceur "Longue Marche" et son programme Change à partir de 2007, a relancé la course à la Lune et à l'espace.

3.4 Le village lunaire

La Lune est donc redevenue une cible de premier plan pour les agences spatiales. Pourtant, plus nous connaissons la Lune et moins il est envisageable d'y développer une communauté humaine durable : il s'agirait plutôt d'établir sur cette planète inhospitalière un avant-poste dans le but de préparer d'éventuelles explorations approfondies du système solaire.

3.4.1 1.1.1 Quelques données intangibles

La Lune, seul satellite naturel permanent de la Terre, est le cinquième plus grand satellite naturel du système solaire et le plus grand des satellites planétaires par rapport à la taille de la planète autour de laquelle elle orbite. La Lune est le deuxième satellite le plus dense du système solaire parmi ceux dont la densité est connue. Elle s'est formée il y a environ 4,51 milliards d'années, de l'impact géant entre la Terre et un corps de la taille de Mars appelé Théia. La Lune est en rotation synchrone avec la Terre, et montre donc toujours la même face à la Terre. Son influence gravitationnelle produit les marées océaniques, les marées terrestres et un léger allongement de la durée du jour.

La distance orbitale moyenne de la Lune est de 384 402 km, soit 1,28 seconde-lumière : un message met donc 2.4 secondes pour un aller et retour, presque instantané vis-à-vis des temps de réponse de systèmes plus éloignés ; la durée du voyage est 3 à 4 jours avec les vitesses actuelles de propulsion. C'est environ trente fois le diamètre de la Terre.

¹⁵ "L'Histoire comique des États et Empires de la Lune" est une nouvelle initiatique relatant un voyage imaginaire sur la Lune. Satire de son temps, ce texte écrit par Cyrano de Bergerac vers 1650 a été publié par son ami Henry Le Bret, deux ans après sa mort survenue le 28 juillet 1655.

¹⁶ "De la Terre à la Lune", est un roman d'anticipation de Jules Verne, paru en 1865.

¹⁷ "Le Voyage dans la Lune" est un film de science-fiction français écrit, produit et réalisé par Georges Méliès, et sorti en 1902.

¹⁸ "On a marché sur la Lune" est le dix-septième album de bande dessinée des Aventures de Tintin, Hergé, 1954.

Quelques dates clés de l'exploration lunaire	
1650	"L'histoire comique des états et empires de la Lune, Cyrano de Bergerac.
1865	"De la terre à la Lune", Jules Verne.
1902	"Le voyage dans la Lune", film de Georges Méliès.
1942	Premier lancement d'une fusée de grande taille, la V2 étudiée par Von Braun.
1954	"On a marché sur la Lune", Hergé.
1957	4 octobre : les Soviétiques lancent le premier satellite artificiel : Spoutnik 1 (diamètre 58 cm ; poids 83 kg). 3 novembre : satellisation de Spoutnik 2 avec la chienne Laïka à bord.
1959	Programme Luna : Luna 1, rate la cible ; Luna 2 s'écrase, 1 ^{er} objet humain sur la Lune ; Luna 3 survole la face cachée.
1961	12 avril : Youri Gagarine est le premier homme dans l'espace. 5 mai : Alan Shepard est le premier américain dans l'espace.
1962	Février : J. Glenn réalise le premier vol habité en orbite autour de la Terre.
1963	16 au 19 juin : Valentina Terechkova est la première femme dans l'espace à bord de Vostok 6.
1965	19 mars : le russe Alexei Leonov effectue la première sortie dans l'espace.
1966	3 février : la sonde soviétique Luna 9 alunet en douceur.
1968	Exploration habitée de la surface lunaire par Apollo 8 en orbite autour de la Lune. Première exploration de visu de la face cachée.
1969	21 juillet : l'astronome Neil Armstrong effectue le premier pas de l'homme sur la Lune lors de la mission Apollo 11.
1970	Luna 16 récupère des échantillons de sol lunaire. Le rover Lunokhod explore la surface lunaire pendant 322 jours.
1971	19 avril : satellisation de la première station orbitale soviétique : Saliout 1. Apollo 15, les astronautes pilotent un rover sur la Lune.
1972	7 décembre : Apollo 17 est la dernière mission à emporter des hommes sur la Lune.
1973	Lunokhod explore la Lune pendant 4 mois.
1977	18 février : premier vol porté de la navette américaine Enterprise, larguée à 7 600 mètres d'altitude depuis le dos d'un Boeing 747.
1979	24 décembre : premier vol réussi de la fusée européenne Ariane.
1980	Novembre : la sonde Voyager 1 survole la planète Saturne et analyse ses anneaux.
1981	12 avril : premier vol opérationnel d'une navette spatiale américaine, Columbia.
1982	25 juin au 2 juillet : Jean-Loup Chrétien est le premier spationaute français.
1986	28 janvier : explosion en vol de Challenger avec 7 astronautes à bord. 19 février : mise en orbite de la station Mir qui devient le premier habitat permanent de l'homme dans l'espace.
1990	24 avril : le télescope spatial Hubble est placé sur orbite.
1997	4 juillet : la sonde Mars Pathfinder se pose sur la planète Mars.
1994	Clementine détecte la présence d'eau dans les cratères polaire de la Lune.
1998	Lunar Prospector détecte la présence d'eau dans les cratères polaire de la Lune. 20 novembre : lancement du premier élément de la station spatiale internationale ISS.
2001	28 avril : Dennis Tito devient le premier touriste de l'espace. Retour contrôlé et destruction de Mir dans sa rentrée dans l'atmosphère.
2003	Premier taïkonaute. 1er février : destruction de Columbia lors de sa rentrée dans l'atmosphère.
2005	14 janvier : la sonde européenne Huygens se pose sur Titan.
2007	Programme chinois Change lancé à partir de fusées Longue Marche. Change 1 a modélisé en 3D certaines parties de la Lune.
2009	L'impact contrôlé de LCROSS/LRO soulève un panache d'eau permettant de mesurer la teneur (0,1%) dans le sous-sol lunaire.
2010	Change 2 en orbite autour de la Lune.
2011	8 juillet : dernier décollage de la navette spatiale Atlantis, ce qui met fin au programme des navettes spatiales américaines.
2013	Change 3 déploie le rover Lapin de Jade pour étudier les minéraux de la face cachée.
2015	14 juillet : premier survol de Pluton par la sonde Horizons.
2019	Change 4 : atterrissage sur la face cachée de la Lune et exploration (rayons cosmique, vent solaire, températures).

La taille apparente de la Lune dans le ciel est presque la même que celle du Soleil, puisque l'étoile fait environ 400 fois la distance et le diamètre lunaires. Par conséquent, la Lune couvre le Soleil presque exactement pendant une éclipse solaire totale. Cette correspondance de la taille visuelle apparente ne

se poursuivra pas dans un avenir lointain parce que la distance de la Lune à la Terre augmente graduellement.

La Lune est un corps différencié, structuré en une croûte, un manteau et un noyau. Son noyau (probablement constitué de fer métallique allié à une petite quantité de soufre et de nickel), partiellement fondu, est petit, avec un rayon d'environ 350 kilomètres. Autour du noyau se trouve une couche de roches partiellement fondues jusqu'à environ 500 km du centre. Au-delà de cette couche limite on trouve le manteau et la croûte, tous deux formés de roches solides mais de compositions chimiques et minéralogiques différentes. La croûte, épaisse (en moyenne) d'environ 50 kilomètres, affleure dans les « terres » ; elle est présente aussi dans les « mers », mais recouverte par d'épaisses couches de lave. La composition chimique de la surface est principalement composée d'oxyde dont la teneur est différenciée selon la répartition entre "terres" et "mers" : silice (45%), alumine (15 – 25%), oxyde de calcium (12 – 16%), oxyde de fer (15 – 5%), magnésium, titane et sodium.

L'eau liquide ne peut pas persister à la surface de la Lune. Lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, l'eau se décompose rapidement par un processus appelé photolyse et se perd dans l'espace. Mais depuis les années 1960, les scientifiques ont émis l'hypothèse que la glace d'eau pourrait se déposer par l'impact de comètes ou être produite par la réaction de roches lunaires riches en oxygène et d'hydrogène provenant du vent solaire, laissant des traces d'eau qui pourraient persister dans des cratères froids. Depuis août 2018, l'analyse des résultats de Moon Mineralogy Mapper (M3)¹⁹ a révélé pour la première fois des « preuves irréfutables » de la présence de glace d'eau à la surface de la Lune.

La gravité moyenne de surface est de 1.644 m/s^2 ; elle présente des anomalies associées à certains cratères d'impacts géants. L'atmosphère de la Lune est si ténue qu'elle n'en a presque pas du tout. La pression atmosphérique 10^{-10} Pa .

3.4.2 Et la course se poursuit

La Chine est actuellement le principal acteur ; le programme Change poursuivi jusqu'en 2023–2024, sera prolongé par la mise en place de la station orbitale "Palais Céleste" (vers 2025), en remplacement de l'ISS, avant le débarquement de taïkonautes sur la Lune (vers 2030).

L'Inde le grand rival asiatique développe aussi son agenda prévoyant une mission habitée (au-delà de 2020), puis sa propre station spatiale.

Les USA ont aussi prévu de retourner sur la Lune à l'horizon 2024 avec le programme Artémis. Prévoyant l'alunissage de trois cosmonautes au pôle sud, ce programme pose les bases d'une présence humaine sur le sol lunaire dans un partenariat avec des compagnies privées afin de démarrer une économie lunaire.

Pour ce programme différents éléments sont indispensables :

- Un lanceur spatial lourd (SLS, Space Launch System, construit par Boeing) capable de faire décoller des missions vers la Lune²⁰.
- Un vaisseau interplanétaire, Orion (NASA, ESA).
- Une station spatiale (LOP-G, Lunar Orbital Platform-Gateway) en orbite autour de la Lune, véritable sas d'entrée vers la surface lunaire, comportant des modules d'habitation, des

¹⁹ M3, (Cartographe de la minéralogie lunaire) est l'un des deux instruments qui constituent la contribution de la NASA à la première mission spatiale indienne vers la Lune.

²⁰ Puis Mars et des astéroïdes dans un deuxième temps.

laboratoires, des dispositifs d'ancrage pour Orion et le module de transfert lunaire. Capable de changer d'orbite, LOP-G permettra d'alunir sur l'ensemble de la surface.

- Un module de transfert pour les allers et retours à la station orbitale.
- Un alunisseur et un module de décollage.

Les programmes futurs			
2018	ESA	ESM	Module d'équipement énergétique de la capsule ORION (prog. Artemis)
	Chine	Change 4	Rover : exploration de la face cachée
2019	Inde	Chandrayaan-2	Atterrisseur + rover
	Chine	Change 5	Prélèvements de régolithe et de minerais, retour d'échantillons
	Israël	Beresheet	Atterrisseur + rover (l'atterrisseur s'écrase sur la Lune)
2020	Corée du sud	KPLO	Orbiteur (Korean Pathfinder Lunar Orbiter)
2021	Japon	SLIM	Atterrisseur (Smart Landing for Investigating Moon)
2022	USA	VIPER	Rover d'estimation de la quantité d'eau
2023	Chine	Change 6	Prélèvements de régolithe et de minerais, retour échantillons
Vers 2020	Inde	Gaganyaan	3 astronautes sur la Lune puis projet type ISS
2023 -2024	Chine	CSS	Le palais céleste relais de l'ISS
2024	USA	Artemis	Alunissage de 3 cosmonautes au pôle sud lunaire
2025	ESA		Mission d'exploration lunaire avec astronautes
2025 - 2030	Inde		Station orbitale
	Chine		Vols habités dans l'espace, puis taïkonaute sur la Lune
Vers 2030	Chine		Robot sur Mars

Pour la réalisation des alunisseurs d'abord entièrement robotisés, puis habités, la NASA fera appel aux constructeurs privés.

Enfin le programme Artemis prévoit d'étudier les ressources de la Lune afin d'y maintenir une présence humaine et de l'utiliser comme terrain d'entraînement pour des missions martiennes.

L'Europe n'est pas en reste. Outre sa collaboration au développement d'Orion et de LOP-G, l'ESA étudie la faisabilité d'une mission lunaire d'ici 2025, composée d'astronautes européens comprenant le lanceur Ariane-6, un alunisseur et un robot lunaire. Le but est double : développer les capacités du transport logistique et démontrer la faisabilité de l'exploitation des ressources du sol.



La course spatiale est bel et bien relancée associant les agences nationales et quelques compagnies privées aux ambitions spatiales fortes : Space X, Virgin Galactic, Blue Origin ; leur but est de vendre un service de transport à des clients achetant du volume sur les modules lunaires afin d'acheminer des technologies de communications, des instruments scientifiques voire de disposer de nouveaux moyens de stockage²¹.

²¹ Comme par exemple des urnes funéraires ! Tout est possible dans le nouveau business lunaire !

3.4.3 Le village lunaire

"J'ai l'intention de construire une base permanente sur la Lune : ce sera une station ouverte pour différents Etats participants, des pays des quatre coins du monde," a expliqué le directeur général de l'ESA, Jan Wörner²² (octobre 2015). Il confirme cette position en septembre 2016 indiquant avoir reçu des réactions positives à cette proposition.

Le village lunaire prévoit une station humaine et robotique permanente sur la Lune, sur la base d'une coopération internationale ouverte aux différents États du monde y participant, et ceci à l'horizon 2030. L'idée fondatrice de cette base lunaire est de permettre aux nations spatiales participantes de continuer à développer un savoir-faire et les techniques pour l'exploration spatiale lointaine, et de leur fournir la possibilité d'utiliser un environnement flexible de vie et de travail sur la Lune. Ce village lunaire viendrait à terme remplacer la station spatiale internationale.

La base pourrait être entièrement robotique sans présence humaine. Sans être exclue, cette option n'a pas été particulièrement mise en avant lors de la communication du concept. Le projet se veut flexible. Le village doit pouvoir abriter différentes activités scientifiques, commerciales ou technologiques.

La Lune est un environnement particulièrement hostile. La surface lunaire est exposée au rayonnement solaire et cosmique, aux micrométéorites et à des températures extrêmes. L'ESA travaille sur une technique d'impression 3D utilisant le sol lunaire pour bâtir des dômes de protection. Le concept prévoit d'envoyer sur la surface de la Lune des dômes gonflables et de les protéger à l'aide de structures imprimées sur place. L'utilisation des métaux, des minéraux et de l'eau sous forme de glace qui se trouvent sur place pourrait rendre possible la construction de cette sorte de village lunaire permanent. Sa construction nécessite un financement assez important à l'image de la station spatiale internationale.

Ce projet permettrait de développer de nouvelles techniques d'exploration spatiales. Le directeur général de l'Agence spatiale européenne estime que vingt ans seront nécessaires pour que les technologies indispensables soient fin prêtes. Le village serait un lieu d'expérimentation pour des missions habitées lointaines. Enfin ce projet donnerait une vision à moyen terme pour l'exploration spatiale.

Outre l'envoi de cosmonautes, de robots à des fins d'exploration, et de satellites de communication, toutes sortes d'activités sont envisagées :

- Construction d'observatoires²³.
- Exploration de la face cachée.
- Développements d'habitats et de laboratoires en impression 3D.
- Exploitation des ressources minières. Le coût de transport depuis la Terre vers l'espace rend l'exploitation des matériaux à la surface de la Lune potentiellement très lucratif. La présence d'eau sur la Lune pourrait permettre de produire par exemple des carburants.
- Tourisme spatial.
- Défense contre les astéroïdes : le village lunaire pourrait jouer un rôle dans un système de défense hypothétique contre la chute d'astéroïdes sur la Terre.

La NASA, la Russie, le Japon et la Chine se sont montrés intéressés par l'idée d'établir une base permanente potentiellement internationale.

²² https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Un_village_sur_la_Lune.

²³ Par exemple, la face cachée de la Lune, à l'abri des émissions radio de la Terre, en fait un site particulièrement intéressant pour l'installation d'un radiotélescope.

3.4.4 Une présence pérenne de l'homme sur la Lune est-elle possible

Sans atmosphère, il faudra toujours y vivre dans des habitacles pressurisés ou engoncé dans une combinaison. En absence d'atmosphère, la vie lunaire est soumise aux bombardements de météorites. Privée de champ magnétique, la Lune est irradiée fortement par les rayons cosmiques du Soleil. Sans compter les effets à long terme sur la physiologie humaine de la faible pesanteur (0.16g).

Le temps de transport court (3 à 4 jours) en état d'apesanteur, n'altérera pas la physiologie des cosmonautes, contrairement au voyage sur Mars. Ils seront opérationnels dès l'arrivée. Leur première tâche sera de concevoir les structures de protection, d'abord à partir de matériaux en provenance de la Terre, puis en utilisant ceux disponibles sur la Lune.

Aidée de robots, l'établissement d'une communauté humaine permanente sur la Lune est tout à fait possible. L'eau glacée des cratères polaires permettra de boire et par hydrolyse de produire de l'oxygène et de l'hydrogène, pour permettre de respirer et produire du carburant. Et pourquoi pas de l'hélium-3 permettant d'alimenter en énergie nucléaire propre les moteurs de vaisseaux.

3.5 Futurs martiens ?

Et Mars, alors !!! La planète rouge suscite bien des espoirs si on en juge le nombre de sondes et de robots que les hommes ont utilisés pour son exploration.

Nous avons consacré une Fête de la Science à décrire les développements technologiques nécessaires, les conditions de vie et les risques d'un voyage sur Mars (voir la référence 10). En résumé :

- Voyage long (au mieux 180 jours en n'économisant pas le carburant, 258 jours dans les conditions les plus favorables, fenêtre de tir tous les deux ans).
- Voyage dangereux pour le corps humain en situation d'apesanteur et soumis aux rayonnements cosmiques.
- Installation sur la planète délicate pour une présence minimum de 580 jours dans une atmosphère ténue composée à 98% de CO₂, dénuée de toutes protections contre les rayonnements cosmiques (absence de champs magnétiques) et UV, absence d'atmosphère, pression basse (0.6% de celle de la Terre), pesanteur faible (38% de la gravité terrestre), température moyenne négative (-63° C), absence d'eau liquide.
- Effets physiologiques sur le corps humain : perte musculaire, déminéralisation, ostéoporose, rythme cardiaque.
- Isolement et troubles psychologiques : la durée des transmissions est limitée par la vitesse de la lumière ; elle augmente avec la distance. Elle est en moyenne de 15 mn mais devient impossible dès que Mars et la Terre sont écrantées par le Soleil.

Certaines nations envisagent aujourd'hui d'envoyer des missions robotisées ou habitées sur Mars. Tout pourrait donc être prêt et il ne resterait plus qu'à fixer la date : 2030 – 2040 prophétise déjà certains pour ce nouveau grand pas dans l'Histoire de l'Homme.

Que ces plans soient très optimistes (voire utopiques ?), là n'est pas vraiment le problème. A plus ou moins long terme l'humanité disposera des moyens techniques d'envoyer des humains sur Mars. Une question fondamentale sera alors posée : est-il raisonnable d'envoyer des humains sur Mars, alors qu'on ne sait pas s'il existe ou existait sur cette planète une vie, ne serait-elle que primitive sous forme bactériologique ?

Le débarquement d'humains, préalablement à cette connaissance, est un risque pour le développement d'une "société martienne". Si la vie existe ou a existé, la présence humaine et l'exploitation des

ressources risquent d'en détruire les preuves, alors qu'il est pourtant primordial de comprendre comment la vie a pu apparaître dans le système solaire autrement que sur Terre.

Jamais une sonde n'a détecté une molécule organique ni de vie à la surface de Mars jusqu'à quelques centimètres. Mais le sous-sol mouillé de glace d'eau pose la question d'une éventuelle vie microbienne. C'est d'ailleurs ce qui a conduit l'ESA à programmer, pour 2020, la mission ExoMars destinée à forer le sol martien sur deux mètres. Si la vie existe encore sur Mars, sa découverte sera importante pour deux raisons :

- Prouver que le processus d'émergence de vie est raisonnablement commun.
- Permettre aux scientifiques d'étudier une forme de vie différente de la vie terrestre et remonter aux scénarios d'émergence de vie dans des environnements différents.

Et même s'il ne restait uniquement que des traces de vie fossilisées du temps où l'eau était abondante sur Mars, certains scientifiques préconisent de s'assurer qu'aucune forme de vie n'existe ou n'a existé, avant d'y envoyer des êtres humains.

D'autant plus que rien ne presse. Aujourd'hui aucun être vivant n'a passé plus de six mois dans l'espace non protégé du bouclier anti-rayonnement cosmique et UV dont est dotée la Terre. Il est probable que seul des robots seront en mesure d'explorer Mars. Les dégâts causés au corps humains par les rayonnements (cancer, mutation), rendent probable qu'un voyage sur Mars aujourd'hui serait probablement létal : le problème du rêve c'est le rêveur lui-même.

4 Terraformation ?

Concept issu de la science-fiction, la terraformation²⁴ a pour but de transformer les environnements naturels d'une planète (ou d'un satellite) du système solaire, dans l'optique d'en faire un terrain d'asile pour l'espèce humaine.

Il existe un terme officiel pour désigner cette science : la biosphérisation. Ce terme, moins médiatisé, déposé au Journal Officiel le 17 avril 2008, définit avec précision la « transformation de tout ou partie d'une planète, consistant à créer des conditions de vie semblables à celles de la biosphère terrestre, en vue de reconstituer un environnement où l'être humain puisse habiter durablement ».

Cette nouvelle science envisage une réponse à la dégradation, sans retour possible, de nos conditions de vie sur Terre.

4.1 Et d'abord Vénus !

Hormis quelques mentions dans des ouvrages de science-fiction du début du 20^{ème} siècle, c'est l'astronome américain Carl Sagan qui fut l'un des premiers scientifiques à se pencher sérieusement sur la question des aspects scientifique de la Terraformation, en proposant une terraformation de notre planète jumelle, Vénus, devenant ainsi un pionnier de l'exobiologie en 1961. La terraformation de Vénus implique de faire diminuer la teneur en CO₂, donc l'effet de serre. L'idée de Carl Sagan était d'injecter en masse des algues dans l'atmosphère vénusienne et, par photosynthèse, de modifier la composition atmosphérique en faisant réagir l'eau, l'azote et le CO₂ pour les transformer en composants organiques. Ce scénario fut jugé irréaliste en particulier à cause de la présence d'acide sulfurique dans les nuages de Vénus et de la forte pression dans l'atmosphère.

Les moyens de réaliser la Terraformation de Vénus restent aujourd'hui opaques. Surtout que la tendance des études qui sont menées suggèrent plutôt que Vénus a subi une anti-terraformation : de

²⁴ <https://www.astropolis.fr/espace-culture/foire-aux-questions/qu-est-ce-que-la-terraformation.html>

petite sœur de la Terre il y a trois milliards d'années, faisant d'elle la première planète habitable du système solaire, elle aurait subi il y a 700 millions d'années une transformation abrupte : il semblerait plus facile de transformer une planète habitable en enfer que l'inverse !

4.2 Et puis Mars

Si Vénus a été un sujet d'étude de la terraformation, la planète qui est le plus souvent associée à cette idée est notre autre voisine, Mars. Elle est également soumise à des conditions extrêmes qui rendent la possibilité d'une vie de type terrestre inexistante, mais d'une toute autre nature que celles de Vénus.

Vénus est trop chaude, Mars est trop froide ... Vénus est soumise à un trop puissant effet de serre, Mars à un trop faible ... Vénus possède une trop forte pression atmosphérique, Mars une trop faible ... Ce qui n'est pas étonnant quand on constate que si la Terre se situe en plein dans la zone d'habitabilité, Vénus est trop avancée, et Mars trop reculée. Encore une fois, c'est le Soleil qui prédomine à toutes les conditions.

Si Mars suscite autant de convoitises, c'est qu'on présume très fortement que l'eau liquide a jadis coulé sur son sol, et que la vie a probablement dû s'y développer pendant un certain laps de temps. Si les explorations récentes n'ont pas détecté de vie sur Mars (voir ci-dessus ExoMars), on sait également qu'il s'y trouve toujours de l'eau ! Et l'eau, c'est un espoir pour la vie.

Il semblerait alors plus « facile » de terraformer Mars que Vénus, et la planète rouge est source de tous les fantasmes. Pourrions-nous redonner à Mars les conditions dont elle bénéficiait jadis pour y abriter de nouveau la vie ? Les différences avec notre planète sont autant d'obstacles que de défis à relever.

L'atmosphère ténue, principalement composée de CO₂, filtrant très peu les radiations cosmiques et les ultraviolets émis par le Soleil, la pression atmosphérique faible, l'effet de serre inexistant, la température moyenne négative, sont peu propices au développement de la vie.

Pourtant l'eau y existe : le pôle sud est un océan d'eau glacée recouvert d'une couche d'une dizaine de kilomètres de neige carbonique. L'objectif pour Mars, serait donc d'élever le niveau de la température. Car alors l'eau pourrait redevenir liquide, libérant son CO₂, l'atmosphère se reconstituerait et la pression monterait, augmentant ainsi l'effet de serre.

Quel coup de pouce initial au déclenchement du processus, quelle impulsion faudrait-il produire pour induire un cercle vertueux ?

Certains spécialistes de la Mars Society pensent qu'il suffirait d'élever la température de 4°C. Mais élever la température globale d'une planète de 4°C, ce n'est pas une mince affaire ... On a pensé à envoyer de gigantesques miroirs aux pôles de Mars sensés réfléchir la lumière solaire et faire fondre les calottes ... Mais le projet semble irréalisable, les miroirs devant faire 200 kilomètres de diamètre ...

Spécialiste de l'effet de serre, l'homme a l'expérience de certains gaz très puissants, plus encore que le gaz carbonique :

- Les fameux CFC (chlorofluorocarbones) qui ont fait tant de mal à notre planète. On pense donc que libérer ces gaz sur Mars accélérerait le processus d'élévation de la température. Mais pour cela, il faudrait y construire de véritables usines ... Ce n'est pas pour tout de suite !
- L'ammoniac est un candidat possible. Présent dans beaucoup d'astéroïdes du système solaire extérieur, il a donc été envisagé de dévier la trajectoire de certains d'entre eux pour les diriger

vers la planète rouge, dans le but de leur faire libérer leurs gaz dans l'atmosphère martienne. Combiné à la production de CFC, ce facteur supplémentaire serait un atout de plus.

D'autres ont pensé assombrir le sol de Mars avec du charbon, dans le but de réduire l'albédo du sol, c'est-à-dire le pouvoir réfléchissant de la surface. Plus l'albédo est important et plus le sol renvoie la lumière solaire, et vice versa. Cela veut dire qu'un sol à faible albédo conserve mieux l'énergie lumineuse, donc la chaleur.

Une fois la température élevée et la pression atmosphérique suffisante, le cycle de l'eau pourrait reprendre normalement. Toute l'eau emmagasinée dans les calottes polaires, mais aussi sous la surface, dans du permafrost, pourrait alors former un grand océan et recouvrir une grande partie de l'hémisphère nord.

De l'eau liquide, une atmosphère de CO₂, voilà qui ressemble à la Terre primitive : resterait à faire la culture de bactéries, algues ou plantes se développant par photosynthèse ! Une photosynthèse massive, comme cela s'est produit dans la jeunesse de notre planète, libèrerait une grande quantité d'oxygène. Mais il est clair que tous ces processus additionnés d'intégration d'organismes vivants ayant pour objectif d'introduire l'Homme durablement sur Mars prendra des milliers d'années, même en optimisant les conditions nécessaires.

Mais inexorablement la faible masse de Mars fait que son atmosphère s'échappe. Même en la recréant au bout de multiples efforts, celle-ci aura une durée de vie limitée sur la planète. Encore que cette évaporation atmosphérique s'opère sur des millions d'années, ce qui serait probablement suffisant pour garder le contrôle sur l'atmosphère.

Sans champ magnétique sur Mars, il resterait à se protéger des particules à haute énergie émises par le Soleil bombardant la surface martienne ! Et là c'est très problématique.

4.3 Et pourquoi pas la Lune ?

Malgré son absence d'atmosphère, et sa pesanteur faible, il a été proposé d'en créer une artificielle et éphémère (durée d'une génération), en récupérant l'oxygène des roches lunaires ou celle présente dans les comètes²⁵ qui fourniraient l'équivalent d'une atmosphère de même pression que celle de la Terre.

D'autres corps système solaire seraient susceptibles d'une terraformation : Europe, Ganymède, Titan, Mercure, Cérés, ...

4.4 Au bout des utopies

Dans tous ces projets, l'ensemencement par des bactéries génétiquement modifiées sur le modèle des organismes extrémophiles²⁶ terriens s'avèrerait très utile pour résister aux conditions extrêmes. Mais l'apparition de la vie puis son développement résulte d'équilibres très instables difficiles à recréer de manières similaires à celles que l'on trouve sur Terre.

On pourrait penser à un village extra-terrestre, zone close transparente habitable sur la plupart de la surface utile d'une planète, voire l'englobant toute entière, à l'abri d'un "toit de verre" disposé à quelques kilomètres au-dessus de la surface et disposant d'une atmosphère respirable par l'homme. Mais cela suppose de disposer de matériaux résistants aux chocs (astéroïdes, comètes), et servant de protection contre les rayonnements. Le pari technologique n'est pas immédiat.

²⁵ Un cube de roche de quelques dizaines de kilomètres de côté ou une centaine de comètes du type de celle de Halley (rayon 5 km).

²⁶ Vivant dans des milieux extrêmes en termes de températures, de pression, ...

On pourrait aussi imaginer de transformer l'Homme pour le rendre compatible avec les conditions extrêmes. L'idée serait de créer un organisme humain génétiquement modifié pouvant subsister dans l'environnement de la planète d'accueil. On s'approche de la pensée transhumaniste.

On pourrait aussi envisager des mégapoles de l'espace, stations spatiales autonomes, tournant sur elles-mêmes, et générant par force centrifuge une gravité artificielle. Les ressources nécessaires pourraient être prélevées sur les planètes environnantes avec des moyens robotisés.

C'est en envisageant de recréer ailleurs les conditions de vie sur Terre que l'Homme perçoit sa fragilité et la difficulté de s'adapter aux crises internes, tels les événements volcaniques majeurs, ou externes tels les impacts météoritiques !

Tous les scénarii de terraformation semblent séduisants, pour peu qu'on mette de côté les notions de délais, de limite physique et physiologique et les coûts financiers d'une telle entreprise.

4.5 Mais au fait, la terraformation est-elle éthique ?

L'écologie d'un corps céleste peut-elle être radicalement transformée dans le but de préserver l'espèce humaine ? Cette question fait écho à notre entrée dans l'anthropocène.

Que ce soit dans quelques milliards d'années quand le Soleil devenu une géante rouge évaporerait toute l'eau sur Terre et la brûlerait, ou dans des délais plus proches si nous sommes incapables de gérer notre croissance, la vie sur Terre est destinée à l'extermination. Pour que la biodiversité ne disparaisse pas, l'humanité devra en sauver une partie en l'emmenant telle une "arche de Noé céleste" s'implanter dans une zone habitable.

Dans la continuité de l'Histoire de la vie, il y a une obligation morale de l'humanité à rendre d'autres corps célestes habitables. A condition toutefois, de ne pas reproduire les effets néfastes de notre gestion actuelle de notre environnement. Il serait dans ce contexte plus justifié de terraformer une planète dénuée de toute forme de vie. Mais comment s'assurer de la stérilité définitive d'une planète ?

Comme on le voit pour Mars, l'absence d'évidence n'est pas l'évidence de l'absence.

4.6 Et a-t-on le droit d'exploiter les ressources spatiales ?

Le droit de l'espace, au sens strict, est la branche du droit international qui traite des activités des États dans l'espace dit « extra-atmosphérique ».

Est-il légal d'exploiter les ressources spatiales ?

Lorsqu'en 1957, l'URSS lance le premier satellite artificiel de la Terre, s'ouvre une nouvelle ère. Au lieu d'étendre les principes applicables à d'autres domaines du Droit des Gens, les Nations, au sein de l'Assemblée générale des Nations-Unies, créent en son sein à partir de 1959, le Comité pour l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique, chargé de définir un corpus de principes et de règles totalement nouveaux.

Les réponses législatives aux questions posées par la course à l'espace ont été très rapides. En 1963, l'Assemblée générale de l'ONU adoptait une résolution qui consacrait les principes fondamentaux relatifs à ce nouveau domaine d'activités. L'espace était exploré et utilisé pour le bien commun de l'Humanité, n'était pas susceptible d'appropriation et ne pouvait être l'objet de souveraineté nationale. En outre, la responsabilité des États actifs dans ce domaine était engagée pour toutes les activités menées sous leur juridiction, qu'elles le soient par leur gouvernement ou par des particuliers. Cette résolution

préfigurait le "Droit de l'espace" stricto sensu définis au sein de cinq traités internationaux²⁷ négociés au sein des Nations-Unies, dont deux spécifiquement consacrés tentent de réguler l'accès à cette "mine d'or" :

- Le Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, conclu le 27 janvier 1967 et entré en vigueur le 10 octobre 1967. Ce traité constitue en quelque sorte la « Charte de l'Espace ». Il reprend la plupart des principes énoncés par la Résolution de 1963 et il consacre le statut « d'envoyés de l'Humanité » des spationautes. Mais il reste vague sur l'exploitation et l'utilisation de l'espace. Malgré ce flou, il a été signé par 108 pays, mais ratifié par seulement 85. Il stipule : "L'exploration de l'espace doit bénéficier à tous les pays, et cet espace doit rester libre d'exploration et d'utilisation par tous les Etats". Seules les armes de destruction massives y sont interdites.
- L'accord régissant les activités des États sur la Lune et les autres corps célestes, conclu le 18 décembre 1979 et entré en vigueur le 11 juillet 1984. Ce dernier traité rencontra sensiblement moins de succès que le précédent quant à son taux de ratification. Ainsi, les grandes puissances impliquées dans la recherche spatiale, telles que les États-Unis, la Russie, la Chine et la France ne l'ont pas ratifié. Le fait qu'il consacre la Lune et les autres corps célestes du système solaire comme « patrimoine commun de l'Humanité » n'y est certainement pas étranger : "...un régime international devra être établi pour gouverner l'exploitation de telles ressources lorsqu'une telle exploitation sera sur le point de devenir réalisable". On y est et pourtant aucune Nation spatiale n'a ratifié l'accord !

Il n'existe donc pas de traité international contraignant interdisant aux Nations spatiales de piller les corps célestes. Au contraire, depuis une dizaine d'années, la raréfaction des financements publics a fait naître l'idée qu'une reconnaissance de la propriété privée dans l'espace était nécessaire pour inciter les entreprises à investir. C'est ce qu'ont fait les États-Unis en 2015 avec la « loi spatiale Obama Space Act », première Loi au monde à autoriser l'exploitation des ressources spatiales par des acteurs privés, aujourd'hui reprise par le Luxembourg. En 2015, les États-Unis ont adopté de manière unilatérale une loi sur la compétitivité dans les lancements spatiaux à usage commercial, statuant que tous les citoyens américains auront droit à toutes ressources provenant *légalement* d'un astéroïde ou de l'espace incluant les droits de propriété, transport, commerce. Le Luxembourg a suivi en assouplissant les normes américaines²⁸.

La communauté internationale renoncerait ainsi progressivement au principe de non-appropriation qui régit le droit de l'espace depuis 1967. "Nous espérons que d'autres pays nous emboîteront le pas", a déclaré Georges Schmidt, ancien consul général du Luxembourg, le 30 juillet 2017.

Une nécessité économique et une garantie juridique pour les partisans de cette évolution. Un renoncement aux principes idéalistes du droit international pour les autres.

²⁷ Les trois autres concernent : le sauvetage des spationautes, leur retour et la restitution des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique, (22 avril 1968), la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux, (29 mars 1972), et l'immatriculation des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique, conclue (14 janvier 1975).

²⁸ https://www.lemonde.fr/economie/article/2017/07/31/le-luxembourg-promulgue-la-premiere-loi-europeenne-sur-l-exploitation-des-ressources-spatiales_5167065_3234.html.

5 Habiter les exoplanètes

5.1 Qu'est-ce qu'une exoplanète ?

C'est une planète située en dehors du système solaire orbitant autour d'une étoile. Petite, grandes, chaudes, froides, gazeuses, rocheuses avec ou sans atmosphère elles sont loin d'être toutes habitables, et surtout elles sont très lointaines. La plupart des exoplanètes détectées se situent à moins de 450 années-lumière ; la première, détectée en 1995, orbite autour d'un Soleil à 51 années-lumière. Plus de 4 000 exoplanètes ont été détectées entre 1995 et 2020. La distance et leur luminosité les rendaient très difficile à identifier, même si on se doutait de leurs existences.

5.2 Comment les voir ?

Ce n'est qu'avec l'évolution des technologies que leurs détections devint possible :

- Le transit de la planète devant son étoile fait varier la luminosité de cette dernière. La luminosité baisse lorsque l'exoplanète passe devant. Cette méthode demande un alignement de la Terre, de l'étoile étudiée et de l'exoplanète. Ces conditions ne sont pas toujours réunies. L'observation d'une étoile ne rime pas toujours avec découverte d'une ou de plusieurs exoplanètes.
- La méthode des vitesses radiales est basée sur l'étude du spectre lumineux de l'étoile. Elle utilise le décalage des raies du spectre d'émission de l'étoile par effet Doppler-Fizeau. La présence d'une planète perturbe le mouvement de l'étoile qui oscille autour d'un point entre la planète et l'étoile. Si l'étoile est en mouvement le long de l'axe de visée, un effet Doppler-Fizeau est possible. Cela peut traduire la présence d'un système planétaire. Cette méthode de détection est plus performante pour des vitesses radiales élevées : autrement dit, pour des planètes évoluant très près de leur étoile, et qui sont très massives.
- La méthode des microlentilles gravitationnelles utilise un effet de relativité générale : l'espace-temps étant courbe aux abords d'une corps massif, la lumière peut être déviée dans cet espace. Elle s'appuie sur la courbure de la lumière émise par une étoile distante lorsqu'un objet massif s'aligne « suffisamment » avec cette source.
- Enfin la méthode d'imagerie directe utilise une forme de traitement des interférences qui apparaissent entre la lumière de l'étoile qui nous arrive, et la lumière de l'étoile qui se reflète sur l'exoplanète puis qui nous arrive. Mais pour pouvoir distinguer la lumière diffusée par les exoplanètes, il faut masquer la lumière de l'étoile qui nous éblouit avec un coronographe (= ?). La coronographie, combinée à de l'optique adaptative, est utilisée pour atténuer la lumière d'une étoile, et permet ensuite d'observer des objets moins brillants gravitant autour.

Cette dernière méthode est la seule à permettre de visualiser une exoplanète. Les trois autres permettent une détection indirecte de l'exoplanète par étude de l'étoile autour de laquelle elle tourne.

5.3 Seraient-elles habitables ?

Une zone habitable ou ZH est une région de l'espace où les conditions sont favorables à l'apparition de la vie telle que nous la connaissons sur Terre. Les planètes et les lunes situées dans ces régions sont des candidates possibles à l'habitabilité d'une planète et donc potentiellement capables d'héberger une vie extraterrestre.

Les limites des zones habitables sont calculées à partir des éléments connus de la biosphère de la Terre, comme sa position dans le système solaire et la quantité d'énergie qu'elle reçoit du Soleil. La zone habitable théorique entoure une étoile où la température de surface des planètes qui y orbitent permettrait l'apparition d'eau liquide.

En pratique, cette zone correspond à celle où l'on s'attend à pouvoir détecter une vie organique de surface par son interaction avec l'atmosphère (biomarqueurs).

Autour du Soleil, la plupart des auteurs situent la zone habitable entre 142 et 235 millions de kilomètres. La Terre, située à 149,6 millions de km du Soleil, serait donc proche de sa limite interne. Comme le Soleil devient progressivement de plus en plus lumineux (sa luminosité augmente de 7 % par milliard d'années), la Terre ne serait plus dans la zone habitable dans 1,7 milliard d'années.

Cependant si par approximation, on admet que la Terre est à peu près au centre de la zone habitable autour du Soleil, on peut calculer pour une étoile quelconque la distance du centre de cette zone à l'étoile selon la taille et la luminosité de l'étoile : l'énergie reçue par une planète étant inversement proportionnelle au carré de la distance à l'étoile, on prend comme référence la distance de la Terre au Soleil (1 AU) et la luminosité de celui-ci. Ainsi pour les étoiles de type solaire, une étoile dont la luminosité est le quart de celle du Soleil aura une zone d'habitabilité centrée à 0.5 AU, et une étoile avec deux fois la luminosité du Soleil aura une ZH centrée à 1,41 UA. Le « centre » de la ZH est donc défini comme la distance à laquelle l'exoplanète devrait se situer par rapport à son étoile pour avoir une température moyenne comparable à celle de la Terre en supposant (parmi beaucoup d'autres conditions) qu'elle ait une atmosphère similaire en composition et en densité.

Comme au cours de leur évolution sur la séquence principale les étoiles deviennent plus brillantes et plus chaudes, logiquement la ZH s'éloigne progressivement de l'étoile. Pour optimiser le potentiel de développement de la vie, une planète devrait se situer sur une orbite qui reste le plus longtemps possible dans la ZH. La ZH est spécifique de chaque étoile.

Appartenir à la ZH ne signifie pas obligatoirement qu'une planète est habitable. Encore faut-il que sa durée d'appartenance soit suffisante, que son atmosphère ne s'échappe pas, autrement dit que sa gravité soit suffisante et qu'elle possède un système de protection contre les rayonnements, (dipôle magnétique par exemple).

5.4 Un long voyage

Rejoindre Mars, notre voisine, demande six mois. Avec les moyens de propulsions actuels, la distance reste un obstacle majeur. A ce jour, seules cinq sondes lancées par l'Homme, ont atteint ou même quitté pour deux d'entre elles les confins du système solaire : il leur aura fallu 40 ans ! Ce qui donne une idée de l'immensité du système solaire malgré les vitesses vertigineuses des engins : plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par secondes ! New Horizons (NASA, 2007) a atteint Pluton, distante de 4,7 milliards de kilomètres, en 2015 à la vitesse de 52 000 km/s ; elle poursuit sa route aux confins du système solaire à plus de 9 milliards de km.

Plus rapide encore, Parker Solar Probe (NASA, 2018) à destination du Soleil, possède le record de vitesse, 95 km/s, après un effet de fronde gravitationnelle obtenu après 6 passages à proximité de Vénus.

La plus proche exoplanète connue est "Proxima Centauri b", appartenant à la zone d'habitabilité de Proxima du Centaure, une naine rouge située à 4,23 années-lumière. Elle est située à 39 711 milliards de km de la Terre. Si le voyage dure 6 mois pour aller sur Mars, alors il faudrait 70 000 ans à la vitesse des sondes les plus rapides pour l'atteindre.

Avec la propulsion nucléaire sérieusement à l'étude pour Mars, le transfert vers Proxima ne durerait que 1 000 ans. Rêvons, la propulsion thermonucléaire, qui n'est qu'au niveau du concept, en permettant de se déplacer à 0.12 fois la vitesse de la lumière limiterait la durée du voyage à 35 ans, en

consommant une énergie équivalente à 100 000 fois l'énergie annuelle utilisée par l'Humanité. S'il était possible de se transporter à la vitesse de la lumière, il faudrait encore 4.3 ans.

Les voyages interstellaires ne sont pas encore d'actualité avec les moyens dont nous disposons.

5.5 A risque ?

Au-delà du temps passé, les flux permanents de rayonnement cosmique et l'apesanteur ont des effets considérables sur la physiologie humaine.

Les particules composants les rayons sont bourrées d'énergie, et peuvent endommager l'ADN et démolir les cellules des êtres vivants, en déclenchant cancers, mutations génétiques, etc... A titre d'exemple, une mission de deux ans et demi sur Mars exposerait les astronautes à une dose cumulée 50 fois supérieure à la dose réglementaire annuelle maximale tolérable pour les travailleurs à risque en France.

Dans l'espace, la mécanique du corps se dérègle. Les connaissances actuelles en physiologie spatiale prédisent un certain nombre de troubles dont pourront souffrir les cosmonautes : le mal de l'espace caractérisé par des nausées des vertiges et des vomissements, la fonte de la masse musculaire, la fragilisation des os, la modification de la circulation sanguine, et l'augmentation de la pression artérielle, la diminution du nombre de globules rouges, le dérèglement du système respiratoire, l'affaiblissement du système immunitaire.

Rappelons qu'à ce jour, le séjour le plus long dans l'espace, dans la station MIR, n'a été que de 437 jours consécutifs.

5.6 Survivre à un voyage aussi long, rêvons toujours ...

L'hibernation par cryogénéisation de tout ou partie de l'équipage vivant pourrait être envisagée, mais n'est à ce jour qu'à l'état d'étude des mécanismes qui régissent les comportements des ours (hibernation²⁹) et des marmottes (hibernation³⁰).

L'envoi d'humains "génétiquement sains" (une centaine multigénérationnelle), se reproduisant et mourant dans l'espace, s'autoalimentant, vivant en totale autonomie n'est pas à l'ordre du jour. Les dimensions de tels vaisseaux devraient être de plusieurs centaines de mètres voire kilomètres.

Les voyages interstellaires, avec leurs nombreux obstacles technologiques, éthiques, économiques, politiques, physiologiques, psychologiques sont difficiles à envisager dans un proche avenir ; seront-ils encore hors d'atteinte dans quelques décennies, siècles ?

5.7 Les extraterrestres où sont-ils ?

5.7.1 Le paradoxe de Fermi

Si notre stade d'évolution nous permet d'envisager dans un délai plus ou moins lointain d'habiter hors de notre Terre, quelque part dans l'espace, alors d'autres que nous auraient sans doute la possibilité de l'envisager. Où sont-ils ? Comment entrer en contact avec d'éventuels extraterrestres ?

Bien des savants et philosophes, de l'Antiquité à nos jours, ont postulés l'existence d'extraterrestres. L'hypothèse remonterait au moins à Anaximandre (vers 610 av. J.-C. – vers 546 av. J.-C.), philosophe grec qui postula l'idée qu'un nombre élevé, si ce n'est infini, de planètes dotées de vie extraterrestre puissent exister.

²⁹ Hypothermie modérée entrecoupée de nombreux réveils.

³⁰ Baisse importante de la température corporelle, état léthargique, baisse du rythme respiratoire et de la fréquence cardiaque.

Kant, dans la critique de la raison pure écrit : " *S'il était possible de décider la chose par quelque expérience, je parierais bien toute ma fortune que quelqu'une au moins des planètes que nous voyons est habitée. Aussi n'est-ce pas simplement une opinion, mais une ferme foi (sur l'exactitude de laquelle je hasarderai beaucoup d'avantages de la vie), qui me fait dire qu'il y a aussi des habitants dans d'autres mondes.*"

En 1950, Enrico Fermi, physicien, Prix Nobel, s'interroge avec quelques collègues : notre civilisation ne serait-elle pas finalement la seule à avoir atteint un stade technologique avancé dans la Voie lactée ? Jusque-là, aucune civilisation extraterrestre ne nous a contactés alors que l'ancienneté de notre galaxie (10 milliards d'années) aurait dû permettre à certaines d'entre elles d'accéder au voyage interstellaire et de laisser des traces dans notre système solaire. Énoncée ainsi cette formulation repose sur plusieurs hypothèses :

- Au moins une civilisation extraterrestre au sein de la Voie lactée, a réussi à développer le voyage interstellaire avec des vaisseaux circulant à une vitesse très inférieure à la vitesse de la lumière.
- Cette civilisation, pour une raison quelconque, explore notre galaxie.
- Elle progresse par bonds, occupant une planète pendant quelques centaines ou milliers d'années, avant d'envoyer des dizaines de vaisseaux vers de nouvelles conquêtes.

D'après les calculs d'Enrico Fermi, l'ensemble de la galaxie devrait avoir été visité par cette civilisation extraterrestre hypothétique après seulement quelques centaines de millions d'années, la faible vitesse de déplacement des vaisseaux étant largement compensée par l'augmentation exponentielle du nombre de vaisseaux d'exploration. Fermi exprime alors ce qui deviendra le paradoxe qui porte son nom : "Si les extraterrestres existent, mais où sont-ils donc ?". Un million d'années ne représentant que peu de chose à l'échelle de la galaxie, "ils" devraient donc être omniprésents et il devrait être impossible de ne pas les voir. Depuis son énonciation, plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer ce paradoxe :

- La tendance à l'exploration de la galaxie par une civilisation extraterrestre est une supposition anthropocentrée, difficile à démontrer (ce n'est pas parce que nous le ferions qu'ils le feraient nécessairement) ;
- L'humanité n'a pas nécessairement pris conscience de toutes les formes de vie qui l'entourent. Comme déjà énoncé : l'absence de preuve n'est pas la preuve de l'absence !
- L'apparition tardive des éléments lourds dans l'Univers, nécessaires au développement de la vie sous sa forme actuellement connue, a pu retarder l'apparition de civilisations extraterrestres.
- Peut-être n'ont-ils aucune raison de se faire connaître ? Pour vivre heureux, vivons cachés !

5.7.2 L'équation de Drake

En 1961, l'astronome américain Frank Drake propose une équation afin d'estimer le nombre moyen de civilisations extraterrestres dans notre galaxie, avec lesquelles nous pourrions entrer en contact, (dont les émissions électromagnétiques seraient détectables, par exemple). Elle s'exprime ainsi :

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

où :

- R^* : nombre d'étoiles se formant par an dans notre galaxie ;
- f_p : fraction d'étoiles disposant d'un système planétaire ;

- n_e : nombre de planètes habitable par système planétaire ;
- f_l : fraction de planètes où la vie est apparue ;
- f_i : fraction de planètes où une forme de vie intelligente est apparue ;
- f_c : fraction de planètes où une vie intelligente apparue est capable de communication ;
- L : est la fraction de la durée de vie planétaire accordée à une civilisation technique.

Si le premier terme est connu avec une assez grande précision (1 étoile par an en moyenne), la grande difficulté réside dans l'évaluation des autres facteurs. On peut néanmoins tenter d'estimer quelques valeurs.

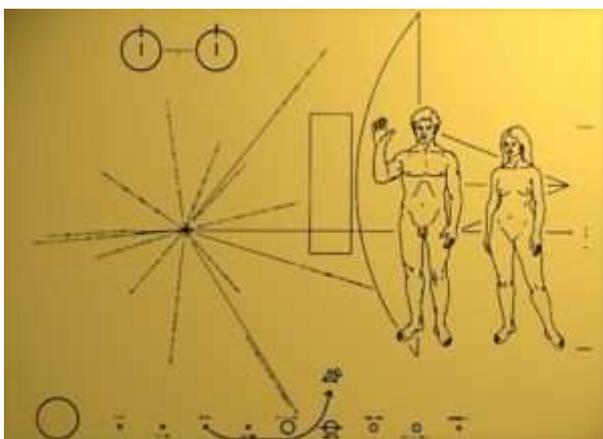
- $R^* \sim 1$;
- $f_p \sim 1$ sur 2 dispose d'un système planétaire ;
- $n_e \sim 1$ sur 5 est habitable par système planétaire ;
- $f_l \sim 1$ sur 10 habitables, abrite la vie, par exemple sous forme bactérienne ;
- $f_i \sim 1$ sur 10 habitées, abrite une forme de vie intelligente ;
- $f_c \sim 1/100$ des planètes habitées abrite une vie intelligente capable de communication ;
- L : la durée de vie planétaire accordée à une civilisation technique est la quantité la plus difficile à estimer, car nous ne connaissons qu'une civilisation, la nôtre.

Ainsi, on constatera aisément que le nombre moyen de civilisations dans notre galaxie est 1 si la durée de vie planétaire accordée à une civilisation est de 100 000 ans ! Et on se rappellera que la nôtre a pour l'instant environ un siècle d'existence depuis l'avènement des émissions d'onde radio et au mieux 10 000 ans depuis la sédentarisation des chasseurs - cueilleurs. Pour qualitatif qu'il soit, ce résultat suggère que nous serions la seule civilisation dans notre galaxie.

Paradoxe de Fermi ou équation de Drake, où sont donc les extraterrestres ? Peut-être qu'au-delà de notre méconnaissance, c'est le terme L qui est le plus problématique : combien de temps une civilisation intelligente peut-elle subsister ? A voire les moyens de s'autodétruire que nous connaissons, est-il possible d'envisager que plusieurs civilisations existent dans la galaxie sans jamais se côtoyer dans le même temps : qu'est-ce que 100 000 ans au regard des 10 milliards d'années d'existence de la Voie lactée ?

5.7.3 Aller à leur rencontre

Depuis Pioneer 10 et 11 (NASA, 1972 et 1973), plusieurs sondes furent équipées de manière à informer d'éventuelles civilisations extraterrestres.



Les sondes Pioneer ont embarqué une plaque métallique, gravée avec un homme et une femme représentés nus, ainsi que plusieurs symboles fournissant des informations sur l'origine des sondes : représentation schématique d'une transition de l'atome d'hydrogène, représentation de la sonde, position relative du Soleil au sein de la galaxie, représentation du système solaire. Il s'agit en fait d'une sorte de « bouteille à la mer interstellaire ». Les sondes Pioneer furent les premiers objets construits par des humains à dépasser

l'héliosphère. Les plaques sont attachées aux sondes de manière à être protégées de l'érosion des poussières interstellaires, si bien que la NASA s'attend à ce que la plaque (et la sonde elle-même) perdure plus longtemps que la Terre et le Soleil.

Il y a 35 ans ce furent aux sondes Voyager de s'élancer vers les étoiles ; elles emportaient chacune un disque à destination d'une civilisation extraterrestre. Baptisé Golden Record, il témoigne de l'existence de la vie et de l'Humanité sur Terre. Chacun de ces disques est en cuivre doré recouvert d'aluminium dans lequel ont été injectés des atomes d'uranium 238 radioactifs. C'est un isotope dont la demi-vie est d'environ 4,5 milliards d'années. Quelle que soit la civilisation dans la Voie lactée qui les découvrira peut-être un jour, avant que le Soleil ne devienne une géante rouge par exemple, elle pourra donc dater le disque et la sonde qui l'emporte.

Les chances que ces objets attirent l'attention d'une intelligence non humaine sont faibles, mais ...

6 Soigner ou quitter notre planète ?

Faut-il choisir ? Si soigner est nécessaire, faut-il pour autant se replier sur une Terre sanctuaire ? L'homme saura-t-il accepter de vivre dans ses limites ? A la suite de Lucy, dans la vallée de l'Omo, homo sapiens n'a cessé de découvrir et d'explorer, alors ...

Table des matières

1	Comment s'est développée la vie sur Terre	2
1.1	A l'origine : la naissance du système solaire	2
1.2	Et vint la vie	2
1.2.1	LUCA (L ast U niversal C ommon A ncesor)	3
1.2.2	Nos lointains ancêtres : les premières structures organiques	3
1.3	Apparition, disparition, renouveau	4
1.4	Pourquoi la vie est-elle apparue sur Terre ?	4
2	Pourquoi quitter la Terre.....	4
2.1	Le surpeuplement.....	4
2.2	L'anthropocène	5
2.3	Et nous ne sommes pas à l'abri d'un astéroïde !.....	6
3	Où partir ?	7
3.1	La proche banlieue : les planètes telluriques.....	7
3.2	Au-delà de Mars	10
3.2.1	La ceinture d'astéroïdes	10
3.2.2	Les planètes géantes	10
3.2.3	Les comètes	12
3.3	De la course à la lune.....	13
3.4	Le village lunaire.....	14
3.4.1	1.1.1 Quelques données intangibles	14
3.4.2	Et la course se poursuit	16
3.4.3	Le village lunaire.....	18
3.4.4	Une présence pérenne de l'homme sur la Lune est-elle possible.....	19
3.5	Futurs martiens ?.....	19
4	Terraformation ?	20
4.1	Et d'abord Vénus !.....	20
4.2	Et puis Mars.....	21
4.3	Et pourquoi pas la Lune ?	22
4.4	Au bout des utopies	22
4.5	Mais au fait, la terraformation est-elle éthique ?	23
4.6	Et a-t-on le droit d'exploiter les ressources spatiales ?.....	23
5	Habiter les exoplanètes.....	25
5.1	Qu'est-ce qu'une exoplanète ?.....	25
5.2	Comment les voir ?.....	25
5.3	Seraient-elles habitables ?	25

5.4	Un long voyage	26
5.5	A risque ?	27
5.6	Survivre à un voyage aussi long, rêvons toujours	27
5.7	Les extraterrestres où sont-ils ?	27
5.7.1	Le paradoxe de Fermi	27
5.7.2	L'équation de Drake	28
5.7.3	Aller à leur rencontre	29
6	Soigner ou quitter notre planète ?	30