



MÉMOIRE

Histoire de l'Astronautique



Vol habité vers Mars, entre utopie et réalité...

09 JANVIER 2019
ELISA AEROSPACE
BELLEC Pierre, LOMBARD Timoté

Table des matières

Abstract	2
Introduction.....	3
Première partie.....	5
Enjeux scientifiques, économiques, sociaux, géostratégiques et politiques	5
Deuxième Partie	10
Facteurs Humains	10
Troisième partie.....	21
Facteurs techniques et technologiques	21
Conclusion.....	36
Sources	38
Annexes	39

Abstract

About how to safely take human beings to and land on Mars

As far as we can go back in his history, Man has been eager to widen the limits of the world he was living in. Having proved able to travel through Space - with the sending of the dog Laïka first, then that of Youri Gagarine - then to land on the Moon surface with the Apollo Program especially with the Apollo 11 mission, he now wants to prospect further.

After several studies such as the Viking Program, it appears that Mars might be the best place for Man to eventually start some sort of colonization. However, before achieving this dream, Man must face several problems, the most important of which is his human nature. Indeed, space doesn't prove the suitable surroundings for him. It induces such troubles as: muscle and heart atrophy, exposition to radiations and so on. Actually, the scientists of various organisations such as NASA -National Aeronautics and Space Administration- and ESA -European Space Agency- ... are working on finding solutions like magnetic shield to preserve the crew from radiations, creation of an artificial gravity in the module to counterbalance muscle atrophy.

To these, we must add technical problems which are many and important as well. Which space rockets? Which modules? Which engines?

Such are the questions the scientist must answer to, before we may think of travelling to Mars.

Introduction

Toutes les agences spatiales du monde s'accordent sur le fait que le voyage vers Mars est le défi du siècle et une société qui arrête d'explorer ne progresse plus. Pour un vol habité, la planète rouge s'est imposée ces dernières années comme étant la parfaite candidate : « à deux pas de la Terre » (environ 228 millions de km en moyenne), elle possède une fine atmosphère, de l'eau à l'état solide en quantité aux pôles, un paysage semblable au désert australien ou au grand canyon américain...

Afin d'étayer notre développement, nous nous sommes appuyés sur des sources bibliographiques : des livres et des magazines nous ont surtout apportés les informations prospectives et des PDF, principalement, de la NASA pour l'aspect historique. Nous avons rencontré des difficultés à trouver des rapports de missions ou de projets en français. Cependant, le site de la NASA nous en fournit en anglais, très détaillés et précis qui nous ont été utiles. Par contre, nous avons été confrontés au problème de confidentialité, où les agences spatiales et les entreprises du domaine protègent, légitimement, leurs travaux et leurs recherches passées et/ou futures. Nous avons aussi regardé des documentaires très enrichissants, accompagnés de témoignages d'ingénieurs, d'astronautes, de médecins...

En termes de méthode de recherches et d'organisation, nous avons commencé par faire une liste des idées principales, disponible **en annexe**, puis nous avons décidé de nous répartir les tâches à effectuer dans le but d'être plus efficaces. Pour être tout aussi performant, nous faisons un point quotidien de notre avancée et de nos recherches. Notre véritable atout, c'est la passion, et plus particulièrement notre volonté d'un jour avoir la chance de travailler pour une mission martienne, parce que nous croyons réellement à la possibilité de voir de notre vivant un Homme poser le pied sur Mars. En ce qui concerne les difficultés nous pouvons citer le fait de concilier travail coutumier avec l'élaboration du mémoire. Aussi, le souci temporel et l'abondance d'informations, toutes très intéressantes et fructueuses, nous ont incité à un effort de synthèse et à dépasser une certaine frustration. De ce fait, nous avons dû nous résoudre à limiter nos écrits sans pouvoir développer et détailler davantage.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons uniquement à la question du voyage aller, déjà suffisamment complexe et problématique. De plus, nous considérons que le matériel nécessaire au déroulement d'une telle mission est déjà sur place, c'est-à-dire que nous traiterons seulement du transport de l'équipage en admettant que tout est présent à la surface, envoyé au préalable et déployé, pourquoi pas, par des robots. C'est pourquoi, il est légitime de se demander quels sont, et éventuellement, comment pallier aux défis humains et technologiques pour un vol habité vers Mars ? Nous essayerons de répondre à cette question en expliquant dans un premier temps certaines raisons, qui selon nous, nous pousseront plus encore à envisager un vol habité vers Mars. Dans une seconde partie, nous exposerons ce qui a toujours été et sera de nouveau un problème dans les vols spatiaux habités : l'Homme lui-même. Enfin, dans la troisième partie nous verrons que, hormis l'Homme, le moyen de transport pour aller vers Mars, comporte son lot de problèmes. Nous apporterons quelques réponses, actuellement en vigueur ou en projets qui dans la plupart du temps sont aussi des solutions pour le facteur humain.

Première partie

Enjeux scientifiques, économiques, sociaux, géostratégiques et politiques

« La Terre est le berceau de l'Humanité, mais on ne passe pas sa vie dans un berceau. »

Constantin Tsiolkovski

Aujourd'hui, nous savons qu'indéniablement, les missions spatiales habitées ont permis à l'Humanité de faire de grands progrès dans divers domaines techniques tels que l'ingénierie, l'électronique, la mécanique mais aussi dans les filières médicales et sociales. Dans les sociétés actuelles, les individus ne sont pas toujours conscients qu'ils vivent entourés de technologies développées à partir de la conquête spatiale. Pourtant, les satellites en sont le parfait exemple, les systèmes de géolocalisations permettent de nous déplacer sans contraintes. De nos jours, les pays disposant d'un accès aux systèmes de positionnement ou radionavigation comme le Global Positioning System (GPS) des Etats-Unis, ont accès aux horloges atomiques embarquées très précises, leur fournissant le temps atomique international et le temps universel coordonné. De même, les bourses mondiales se connectent peu à peu à ces horloges, ainsi, elles peuvent dater avec la plus grande précision possible les transactions financières. C'est-à-dire que les économies de puissants pays dépendent de ces satellites et donc les pays émergents principalement sont tributaires de grandes puissances maîtrisant les systèmes de positionnement.

Aussi, les satellites de positionnement et d'observation, nous offrent des possibilités de communication et de planification de missions vers Mars beaucoup plus précises et complètes. L'informatique s'est principalement développée avec la volonté de découvrir l'Espace. En effet, les ordinateurs, les composants électroniques et l'automatisme n'ont cessé de se complexifier. La situation actuelle, tend à montrer que les Etats-Unis, possèdent une grande maîtrise de ces domaines mais ce n'est pas un hasard, grâce à leurs diverses missions : Mercury, Gemini, Apollo, ..., ils ont été des précurseurs et des innovateurs qui leur ont permis d'affirmer un leadership. Aujourd'hui cela nous rappelle qu'il est difficilement envisageable de considérer une mission vers Mars sans la contribution des Américains.

De plus, les missions spatiales ont induit une amélioration des circonstances d'existence des êtres humains. Notamment une des inventions de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) : les membranes organiques développées pour recycler l'eau dans l'Espace, est utilisée pour purifier l'eau d'une école au Maroc. D'ailleurs, l'habitabilité de la capsule ne doit pas se limiter au confort précaire des astronautes des missions Apollo, il faut envisager un module fiable sur le long terme. Indéniablement, si nous trouvons des solutions à ces problèmes, alors nous pourrions les adapter à ceux auxquels nous faisons face sur Terre comme la densification des villes voire la surpopulation des territoires. De plus, le vaisseau devra protéger des rayonnements solaires et cosmiques mortels, être équipé de systèmes de production et de recyclage d'air, d'eau, de

déchets biologiques... Les découvertes que nous ferons à ces sujets auront sûrement des retombées sur Terre à l'image de l'usine de traitement des eaux au Maroc.

Par exemple, le textile développé pour les astronautes se retrouve dans les chaussures de course puis les aliments lyophilisés ou les aliments enrichis pour bébé ont pour origine les programmes spatiaux. Aussi, avec un intérêt public, la médecine s'est perfectionnée à partir de la médecine spatiale, les retombées spatiales dans notre quotidien sont réelles, l'imagerie par résonnance magnétique initialement développée pour examiner la surface de la Lune est toujours utilisée par les scanners de nombreux hôpitaux à travers le monde.

Les travaux de l'administration nationale de l'aéronautique et de l'Espace (NASA), ont également contribué à des progrès médicaux comme les tests sanguins rapides, les pompes cardiaques artificielles et les prothèses de membres. Le développement de robots et d'exosquelettes télécommandés promettent de révolutionner les services d'urgences et de secours. Sur le plan médical, un autre domaine va sans aucun doute se développer, c'est l'éthologie qui consiste à étudier le comportement des êtres vivants dans leurs milieux naturels et en particulier les humains. En effet, une mission vers Mars, avec les considérations techniques actuelles, nécessitera plusieurs mois en milieu fermé. L'enjeu majeur pour cette science, est de comprendre comment se comporte l'astronaute et apprendre à vivre loin de la Terre. Les solutions trouvées auront sans aucun doute des applications terrestres comme dans le management des Hommes face au stress.

Les progrès scientifiques accomplis dans l'élaboration au moins conceptuelle d'une mission habitée vers Mars seront conséquents, ils pourraient assurer une certaine légitimité et apporter une justification aux propositions de missions vers Mars de la part des agences spatiales auprès de l'opinion publique.

Outre les enjeux scientifiques, développer un tel projet permettrait aux pays participants de se placer dans une dynamique compétitive de croissance économique. De nos jours, les entreprises des « anciennes puissances occidentales » sont confrontées à la désindustrialisation, à la délocalisation et à la concurrence des pays émergents. Pour faire face, les états s'endettent, ils tentent de compenser grâce aux subventions, allocations ou exonérations. Pourtant, même si cela pourrait paraître paradoxal aux vues du budget nécessaire pour une telle mission (des dizaines de milliards de dollars), les impacts et les retombées économiques ne seront pas négligeables : création d'emplois, croissance économique, développement des échanges commerciaux... Par exemple, les missions Apollo ont permis de moderniser et dynamiser des

territoires américains et de créer des emplois (durant celles-ci, l'effectif de la NASA a atteint 400 000 employés). Elles ont aussi permis une explosion de la demande en équipements manufacturés dans tous les domaines comme le montre **la figure 1 en annexe**. Nous pouvons voir sur celle-ci que les commandes en biens d'équipements dans le secteur aérospatial ont quasiment doublé avec une croissance de près de 90% entre la fin des années 1950 et la fin des années 1960. Ce qui correspond exactement à l'instant où les missions Apollo étaient à leur paroxysme.

Mais les sociétés (la population et les politiques) ne semblent pas toujours disposées à diriger une partie des finances publiques dans la recherche et le développement, notamment dans le spatial. Dans la plupart du temps, ne voyant pas l'utilité de « sacrifier » une part du budget annuel à des efforts de recherche et développement « ne portant leur fruits » que dans le long terme. L'intérêt porté par les sociétés à propos des missions spatiales est redirigé vers des préoccupations à court terme dépendant généralement des conjonctures économiques et sociales souvent défavorables. **La figure 2 en annexe** montre l'imbrication des trois « cônes des retombées économiques » avec la conquête spatiale. Le premier étant le cône de l'investissement public (les contribuables), incluant le deuxième, représentant les achats et les salaires versés par les sociétés publiques et privées participant aux projets (comme les agences spatiales), contenant le dernier cône illustrant les répercussions technologiques et leur impact sur les processus de production (par exemple, l'optimisation de l'agriculture par des observations satellites). Ce dernier est en plein essor puis est intimement lié aux progrès scientifiques dans le domaine du spatial. Cependant, il est de nos jours, difficile d'évaluer quantitativement ces conséquences. Nous pouvons néanmoins imaginer que dans le futur, cette volonté intrinsèque à l'Homme, d'apprendre davantage sur notre monde et si nous supposons qu'une mission vers Mars est majoritairement approuvée par l'opinion politique et public mondiale, alors le schéma précédant se verrait modifié (**voir figure 3 en annexe**) de telle sorte que les résultats économiques des évolutions technologiques dépasseraient les investissements publics.

En outre, une mission vers Mars raviverait la petite flamme qui brûle encore pour celles et ceux qui ont connu l'essor des missions spatiales habitées. Mais elle susciterait aussi davantage l'intérêt des nouvelles générations. L'impact de tels projets est considérable, le besoin de perspective combiné à une part de rêve, aident les nouvelles générations à se constituer psychologiquement et émotionnellement. Le couple dans lequel s'inscrivent progéniture et innovation sont mutuellement dépendants et assure l'avenir de l'Humanité. D'autant, que la

planète Mars n'a cessé de révéler ses secrets ces dernières décennies. En fait, l'histoire nous montre que les programmes spatiaux habités, surtout aux Etats-Unis, ont uni la population. Cependant, en observant le comportement de la société américaine et dans le monde, nous nous apercevons qu'envoyer des Hommes sur la Lune était devenu « banale », la Terre qui l'espace d'un instant s'était presque arrêtée de tourner, repris son activité normale. C'est pourquoi, il semblerait que les sociétés ont besoin de renouveau et d'innovation et quoi de mieux qu'une mission vers Mars, le premier Homme sur la Lune à rassembler des centaines de millions de spectateurs à travers le globe alors, imaginons avec les technologies actuelles le nombre de personnes impactées. Cela redonnerait un élan, qui ne serait être égalé que par une importante découverte scientifique et que les individus attendent depuis longtemps et ferait de l'ombre aux situations mondiales actuelles. De plus, si la Lune était « le palier », Mars est la « porte d'entrée » à la conquête habitée de l'Espace où nous trouverons probablement, les réponses aux questions de notre existence et de notre destin. L'esprit de conquête et d'exploration est intrinsèque à l'être humain et nous ne pouvons ne pas imaginer que l'Homme puisse se cantonner à la Lune.

Enfin, nous savons qu'après la maîtrise de la terre, de l'eau et du ciel, il paraissait évident que les états tentent d'affirmer leur souveraineté et leur puissance à travers l'Espace. Véritable outil de dissuasion et d'expression de suprématie techniques et technologiques, l'Espace ne se devait d'être encore un territoire d'affrontement militaire et fort heureusement le monde l'a relativement bien compris. Ainsi, les institutions internationales et nationales ont légiféré l'Espace et sont parvenues à des accords communs. Malgré tout, il est indéniable que certains pays ont et continuent aujourd'hui d'imposer leur leadership. Nous pouvons citer les Américains qui en relançant leur ambition dans le domaine de l'exploration spatiale habitée en corrélation avec l'insertion dans la course à l'Espace 2.0 des pays émergents telle la Chine, montrent qu'ils se soucient de leur statut de leader. Les volontés géopolitiques dépendent fondamentalement des états mais aux vues de l'ampleur des investissements et de la nature du projet porté au nom de l'humanité et de la paix, nous devons coopérer sans s'affranchir de la compétition nécessaire au développement.

Deuxième Partie

Facteurs Humains

« On ne fait rien d'extraordinaire sans hommes extraordinaires et les hommes ne sont extraordinaires que s'ils sont déterminés à l'être. »

Charles de Gaulle

Une problématique majeure dans l'élaboration d'un plan de vol pour une mission vers Mars est ce que nous appellerons le facteur humain, c'est-à-dire tout ce qui est inhérent à la psychologie et la physiologie des êtres humains. En effet, l'Espace est un milieu étranger pour l'Homme qu'il découvre de jour en jour et il par conséquent inéluctable de prendre en compte cet aspect pour l'élaboration d'une mission habitée vers Mars. En d'autres termes, l'Homo sapiens, intrinsèquement terrestre peut-il évoluer en « Homo spatius » un être destiné à l'aventure spatiale. A première vue, nous pourrions croire que cela paraît impensable, néanmoins l'Homme n'a cessé d'explorer et parfois à dû s'adapter à des environnements nouveaux voire même hostiles. En effet, il a gravi les plus hauts sommets, parcouru les deux pôles, prospecté les fonds sous-marins, visité les volcans, les déserts dans des conditions extrêmes. Alors dans sa détermination à sans cesse repousser ses frontières et ses limites pourquoi l'Espace lui résisterait ? Voilà 50 ans que nous défions notre nature d'humain à la conquête de l'Espace, et à quelques années espérons ou au moins quelques décennies, d'une exploration humaine de Mars une question demeure : notre organisme peut-il supporter un tel voyage ?

Aujourd'hui les scientifiques, les spécialistes des missions spatiales et les spationautes s'accordent sur les principaux effets d'un séjour dans l'Espace tels que : nausée, vertige, stress, mélancolie, irradiation, angoisse, fonte du corps sont autant de notions à analyser. En outre, sur Terre et dans l'Espace, le corps humain évolue en fonction du sexe (**voir annexe figure 4**). En absence de son environnement naturel chaque fonction vitale de l'Homme devient donc un problème à résoudre. La médecine spatiale cherche à adapter un corps humain façonné par des milliers d'années de vie terrestre, par exemple il faut compter environ 250 examens médicaux et psychologiques avant tout vol spatial. La spationaute italienne Samantha Cristoforetti à passer 199 jours dans l'Espace, et pourtant selon elle, « l'attente dans la capsule est le plus dur psychologiquement ».

Déjà au décollage les astronautes subissent les contraintes liées aux fusées et plus précisément le besoin d'échapper à l'attraction terrestre qui nécessite d'atteindre des accélérations, vitesses et altitudes adaptées. C'est pourquoi, les astronautes reçoivent les effets de l'accélération (facteur de charge), des vibrations et des chocs de la carlingue même s'ils sont entraînés et sélectionnés en conséquence. Nous avons donc l'impression que dans cette aventure l'être humain est le « maillon faible », le plus complexe et même la plus énigmatique des inconnues dans l'équation.

De plus, la fusée est le symbole du génie humain pourtant elle contraste avec la fragilité des corps des astronautes à l'intérieur. En effet, à l'arrivée de l'équipage dans l'Espace, nos a priori se confirment, l'organisme n'est bel est bien pas adapté directement à l'impesanteur (enfin pour l'instant). Comme, lorsque les astronautes après s'être extraits du vaisseau Soyouz, pénètrent dans la station spatiale internationale (ISS) il n'est pas rare qu'ils se sentent nauséeux, ou qu'ils aient des malaises les premières heures, certains les premiers jours. Cela s'explique d'une manière assez intuitive et simple : la perception (yeux) de l'astronaute et le ressenti du corps (oreille interne) sont sur Terre conjugués, mais dans l'Espace ils sont conflictuels. Cela induit une réaction innée du cerveau, il est « déboussolé », en fait, c'est comme si un corps étranger s'était immiscé dans l'organisme. Par exemple, les nausées et les vomissements sont associés à un empoisonnement, le cortex cérébral à l'impression que l'être humain s'est intoxiqué. De plus, l'oreille interne n'a plus la sensation de verticalité, en apesanteur le spationaute ne sent plus de « haut » ou de « bas », simplement trois dimensions et l'astronaute à un sentiment de désorientation, il ne peut se baser uniquement sur la vision. A l'image des novices qui arrivent dans l'ISS et rencontrent des difficultés à se repérer dans la station spatiale internationale. Cette impression d'être collé au plafond, de plonger en avant, de tomber dans le vide et les problèmes de direction s'ajoutent donc à la liste des problèmes à résoudre pour une prochaine mission habitée vers Mars. Néanmoins, après quelques jours, le corps lui-même semble s'adapter et s'habituer peu à peu à l'apesanteur. Des zones du cerveau se transforment, notamment, la zone qui gère l'équilibre s'inhibe, les nausées tendent ainsi à s'estomper et nous savons dans quelles zones du cerveau à lieu l'apprentissage.

Pour la première fois, une équipe de neuroradiologues américains de l'Université de Caroline du Sud et allemands de l'hôpital universitaire de Frankfort a pu comparer les imageries par résonance magnétique (IRM) de cerveaux d'astronautes (**voir annexe figure 5**), avant et après leur séjour dans l'Espace. Parmi ces astronautes, 18 ont fait un séjour de longue durée avec un temps de vol moyen de près de six mois et 16 ont effectué des missions courtes de quelques jours. Les médecins qui ont observé les clichés ne connaissaient ni le nom des astronautes ni la durée de leur séjour dans l'Espace, l'avis qu'ils ont porté est donc objectif. Or leurs résultats montrent que dans la plupart des cas, le cerveau a été affecté par le voyage dans l'Espace particulièrement chez les astronautes ayant effectué des séjours de longue durée. Un rétrécissement du sillon central a pu être observé auprès de 17 des 18 astronautes ayant effectué des vols de longue durée, alors que cette anomalie est survenue seulement chez 3 des 16

astronautes partis en mission courte. En outre, un déplacement du cerveau vers le haut a été constaté chez 12 astronautes après des vols longue durée.

Donc pour une mission habitée vers Mars, il est nécessaire d'accélérer cette gymnastique cérébrale, habituer le cerveau humain à basculer rapidement de la gravité à l'impesanteur et réciproquement. Maintenant, les scientifiques doivent identifier précisément les marqueurs biologiques pour les influencer ou les rendre plus efficaces et de trouver des stimulations artificielles pour assouplir le cerveau. Une autre solution est tout simplement de développer l'imagination, dans le but d'entraîner et développer certaines aires du cerveau, faire imaginer des activités précises et espérer les préparer de cette manière à de longues missions. Nous le savons, l'environnement spatial métamorphose le cerveau, tel un « miracle de la nature » nous nous habituons relativement vite si bien qu'en impesanteur nous ne nous sentons plus malades mais nous éprouvons plutôt, une sensation de légèreté, de liberté absolue. L'astronaute ne ressent plus aucune tension dans son corps et il est relaxé. C'est pourquoi, les capacités d'adaptation de l'Homme peuvent encore nous surprendre et ne sont pas limitées.

En outre, le corps se transforme quand même, il perd sa condition de terrien, son activité métabolique est modifiée, le corps humain est en quasi état de léthargie. En effet, comme les déplacements sont facilités, le corps « se débarrasse des muscles inutiles » ou ils sont beaucoup moins sollicités et s'atrophient. Le corps humain possède quelques 639 muscles dont 60% d'entre eux luttent constamment contre la gravité. Si le muscle n'est pas sollicité il perd de la masse et rétrécit, l'astronaute ressent d'importantes douleurs musculaires durant le vol et à son retour sur Terre. En particulier, pour un voyage dans l'Espace d'une dizaine de jours un astronaute peut perdre en moyenne 20% de sa masse musculaire, cela illustre alors la nécessité de pratiquer des exercices physiques intenses et réguliers.

Aussi, les astronautes s'exposent à la « maladie des caissons » ou mal de décompression qui résulte d'une exposition rapide de l'organisme à une diminution significative de la pression atmosphérique, l'azote présent naturellement dans le sang et les tissus forment des bulles (**voir annexe figure 6**) parfois entre les os, qui peuvent aller de sensations de picotements, à des malaises et même provoquer la mort de l'individu.

Il est donc nécessaire de pressuriser la capsule, mais nous connaissons déjà ce problème puisque dans l'ISS la pression est maintenue proche de la pression atmosphérique à savoir environ mille hectopascals. Mais, il arrive que nous ayons besoin de ravitailler en air frais et de « regonfler » la station suite aux micro-fuites dues aux activités extravéhiculaires et aussi puisqu'elle n'est

pas parfaitement hermétique. L'Agence européenne a notamment envoyé son véhicule automatique de transfert ATV- 4 Albert Einstein en 2013 pour « regonfler » l'ISS. Alors que pour une mission vers Mars, il nous serait difficile d'opérer de telles procédures, ce qui impose quelques contraintes quant à l'étanchéité et la réelle nécessité de sorties dans l'Espace pour des réparations ou autres interventions. Malgré que ce type de module pourrait nous inspirer pour de potentiel « cargo » de ravitaillement martien. De plus, pour l'équipage, observer s'amarrer « un corps » venant de la Terre provoque un sentiment rassurant et inhibe la sensation d'abandon.

Cependant, il faut absolument éviter que le corps fonde, le système immunitaire et cardio-vasculaire sont aussi affectés, par exemple la diminution des globules rouges est de 10 à 15% et même plus selon la durée de la mission. Le sang afflue plus facilement au cerveau et le cœur est donc moins sollicité. Pour une mission vers Mars, il nous faudra développer les technologies déjà utilisées dans les stations spatiales comme dans l'ISS. A savoir, des exercices de musculations ou plus généralement des exercices sportifs adaptés à l'apesanteur, comme par exemple un tapis roulant où l'astronaute est maintenu attaché par des élastiques ou des machines qui le maintiennent au sol.

Cela peut paraître incongru mais néanmoins ces séances quotidiennes sont indispensables, puisque malgré les efforts les os se fragilisent et les muscles s'atrophient progressivement mais fort heureusement beaucoup moins vite grâce aux entraînements sportifs quotidiens. En moyenne, un humain perd 20 % de sa masse osseuse durant sa vie, un astronaute perd la même masse en seulement six mois de vol ... Dans l'Espace les os sont dégradés en permanence, ils deviennent fragiles et perdent des minéraux comme le calcium et le potassium. Sur Terre le calcium qui se trouve dans les os est fixé temporairement, mais les os peuvent se « reconstruire » constamment grâce aux sels minéraux qu'on trouve dans l'alimentation comme les produits laitiers. Le squelette du corps humain a besoin de calcium chaque jour pour rester solide. Le corps est en apesanteur, le calcium présent dans les os quitte ces derniers pour se rendre dans le sang, puis quitte le corps par l'urine, les os manquent de minéraux, ils deviennent très fragiles : ce phénomène est appelé l'ostéoporose (**voir annexe figure 7**), les astronautes perdent en moyenne 100 grammes de calcium par jour, alors que le corps possède une réserve d'environ 1 kilogramme.

En clair, pour un vol en direction de Mars, des équipements sportifs seront nécessaires pour limiter les effets de pertes de masses (osseuses et musculaires) et aussi fournir aux astronautes une occupation. Si nous voulions absolument les abstenir d'être à l'impesanteur, il nous faut

développer le concept de gravité artificiel. Ce qui n'est pas à négliger puisque sur Mars l'équipage n'aura guère le temps de se réhabiliter, il faudra être opérationnel le plus rapidement possible, rien ni personne ne sera présent pour les accueillir contrairement à l'ISS. De plus, nous avons déjà constaté que lors du retour sur Terre, certains astronautes sont pris de malaises, le cœur affaiblit n'irrigue plus correctement l'encéphale, il doit se réadapter à la gravité terrestre. C'est pourquoi il serait très intéressant de développer un système de gravité artificielle progressive simulant petit à petit la gravité de Mars qui est de $3,711 \text{ m.s}^{-2}$, soit un tiers de celle de la Terre, plutôt que les exposer à l'apesanteur. Cependant, nous avons que très peu d'idée des effets de cette micro gravité sur l'être humain mais a priori, il est préférable que les spatonautes soient soumis, au moins, à une faible gravité.

Le spectacle éblouissant de la Terre depuis l'Espace devient pervers, le film continu d'un paradis proche mais inaccessible entraîne un attachement insatiable à la Terre. En effet, les astronautes ont découvert que certes vue de l'Espace la Terre est magnifique mais s'ils tournent la tête dans l'autre direction c'est un autre spectacle qui s'offre à eux. Peut être tout aussi grandiose mais surtout plus appréhensif. En effet, la vision du noir absolu de l'Univers provoque chez certains astronautes un sentiment d'inconfort, de malaise et l'équipage « martien » ne verra plus la Terre, nous n'en connaissons pas les conséquences psychiques. Généralement, cette impression de solitude, ce sentiment d'être au milieu de nulle part, induit une recherche de soi, à l'image de scientifiques étudiant la fonte glaciaire en Antarctique. Cette quête existentielle à savoir qui nous sommes d'où venons-nous ou quelle est notre place dans la société, il est alors légitime que « les pionniers martiens » se l'imposent. Toutefois, ils doivent veiller à ne pas avoir de pensées négatives ou nostalgiques voire pessimistes, cela nuirait au bon fonctionnement de l'équipage.

L'Humanité lorsqu'elle a découvert pour la première fois la Terre entière vue de l'Espace en 1972 avec la mission Apollo 17, a eu deux révélations. D'une part, elle a pris conscience de la fragilité de la Terre et se doit de partir vers Mars avec ces nouvelles considérations. D'autre part, elle a redécouvert et confirmé son lien essentiel avec la Terre. C'est pourquoi, lors d'un long séjour dans l'Espace, l'Homme devra pallier au manque de sensation terrestre.

Il est donc primordial d'imaginer des substituts, il faut que l'équipage puisse fasciner et se remémorer sans effort en emmenant des « morceaux de Terre ». A l'image du cosmonaute Mikhaïl Kornienko, qui eut l'idée d'emporter des enregistrements de sons d'éclairs à bord de l'ISS, il raconte que l'astronaute Scott Kelly les écoutaient sans cesse, preuve qu'il est

bénéfique pour les astronautes d'avoir parmi, « le silence pénible des machines », des sons connus et rassurants dont le but est de se détacher ne serait-ce qu'un instant de son quotidien.

Actuellement, dans la station spatiale, l'oxygène circule des machines de recyclages aux organismes, couplé avec les difficultés pour dormir, se laver, aller à la selle ou uriner même manger relèvent parfois d'un défi. Cet inconfort pèse sur le moral de l'équipage, tout est artificiel, pas de changements de nourriture, d'eau et de paysage. L'environnement au sein d'une capsule est monotone mais une solution nous est venue peut après la naissance d'une technologie qui pourrait nous être très utile. En effet, la réalité virtuelle (VR) permet aux astronautes des expériences apaisantes d'immersion dans la nature ou dans des scènes urbaines, qui ravivent des souvenirs de la vie terrestre. Nous pouvons aussi en envisager des fonctionnalités techniques comme l'aide à la navigation ou à la gestion des différents modules.

Non seulement du fait de la répétitivité des tâches et de l'éloignement avec la Terre, l'astronaute peut être mélancolique mais ce n'est pas tout. Effectivement, il est indéniable qu'un vaisseau spatial sera limité par sa taille (du moins au cours ces prochaines décennies), c'est par conséquent un milieu clos où la promiscuité contraint les astronautes aux dialogues et à la bonne entente. Il est indispensable de créer le contact avec les autres, de faire un effort conscient pour être sociable malgré un moral fluctuant. Avec la Terre, les familles manquent terriblement aux astronautes et les conversations en temps réel sont impossibles, aujourd'hui nos capacités techniques en matière de télécommunications ne nous permettent que d'émettre un message avec 20 minutes de délai à la réception sur Mars. La communication manque énormément aux spationautes, ils expriment tous ce besoin de diversité des individus et du quotidien, ils ne résignent pas leur désir de contact humain. Dans les scénarios les plus probables, une mission vers Mars, durerait entre deux et trois années, l'équipage pourrait être confronté, comme l'ont montrées des expériences d'isolement, à des hallucinations ou des crises de folie. L'équipe est alors confrontée à des situations sociologiques extrêmes et inédites, qui par le contact humain et le dialogue peuvent être endiguées.

Les astronautes, rationnels au sang-froid et malgré leur sélection très restrictive peuvent être « faibles » psychologiquement parce que dans l'Espace nous n'avons pas le droit à l'erreur. Cela peut être fatal, par conséquent il est important qu'ils soient à un niveau de concentration maximale mais il ne faut pas non plus les stresser. C'est-à-dire que les relations avec le centre de contrôle doivent aussi être satisfaisantes pour assurer le succès de la mission. De plus, une solution pour apprendre aux futurs astronautes à gérer toutes les situations décrites précédemment, serait de les former grâce à des vidéos pédagogiques. Elles leur enseignent par

exemple, l'importance de prendre du recul sur les situations difficiles pour notamment apprendre à canaliser ses problèmes psychologiques vers le centre de contrôle plutôt que vers les autres astronautes, des tensions entre membre de l'équipage mettraient inévitablement en péril la mission et ne sont donc pas envisageables.

Mais alors comment choisir l'équipage ? Il est quasi impossible d'apporter une réponse claire et précise à cette question pour la simple et bonne raison que c'est une science inexacte hormis le fait qu'avoir le goût de l'aventure est une condition nécessaire mais pas suffisante. Nous pouvons bien évidemment nous appuyer sur les méthodes de sélections « traditionnelles » comme les stages de survies en milieux hostiles, des critères de résistance au stress... Mais nous pouvons surtout dégager des traits de caractères importants : courage, professionnalisme, il est important d'être en accord avec soi-même et de supporter la solitude. Au cours de la « conquête spatiale », le professionnalisme des astronautes, qui s'est illustré face aux incendies, à des fuites toxiques... montre qu'à travers ces situations critiques il renforce les liens et la coopération des cosmonautes de différentes origines. Les spationautes se concentrent davantage sur les systèmes (corps humain, machine) lors de crises. Puisque machine et Homme font corps dans un unique but commun maintenir le vaisseau viable. C'est alors, un aspect révélateur de la mutuelle dépendance des machines et des Hommes qui est encore plus marqué pour une mission vers Mars.

A cela, s'ajoute le problème de la mixité homme/femme. Avec les préjugés de la supériorité masculine encore trop présente dans nos sociétés, nous ne sommes pas à l'abri d'agressions entre homme et femme. Aussi, la capsule doit être adaptée aux hommes comme aux femmes pour un voyage tel que celui vers Mars. De ce fait, nous pouvons nous poser des questions quant à la similitude des nécessités d'hygiène et de confort pour les deux sexes. La question de la mixité esquisse un autre problème, tabou pour les agences spatiales : la sexualité. En effet, les astronautes surtout masculins peuvent en témoigner et par conséquent il semblerait qu'il ressente davantage l'envie de fumer ce qui est évidemment impensable dans une capsule spatiale. Impensable aussi de créer un espace fumeur, trop de ressources et d'espaces utilisés inutilement. Dans tous les cas si mixité il y a, ces questions vont se poser et l'Europe semble actuellement la plus ouverte sur ce sujet, les États-Unis et la Russie étant notamment des pays un tant soit peu conservateurs. Faut-il alors constituer un équipage composé uniquement d'hommes, de femmes ou de couples ? Et la réponse à cette question est fondamentale puisque si elle dépend elle-même de beaucoup de composantes, elle sera probablement la réponse à très grands nombres d'autres critères.

Par ailleurs, un autre problème non négligeable peut affecter la santé des astronautes. En effet, des bactéries qui peuvent être accidentellement apportées avec les astronautes ou provenir de l'Espace, peuvent survivre dans le vide et dans l'Espace, ainsi, il leur est plus facile de muter et entraîner des infections ; auquel le système immunitaire des terriens n'est pas préparé. Les réactions infectieuses sont aggravées dans l'Espace puisque le caractère pathogène augmente. L'apesanteur est un environnement favorable, il influence l'expression génétique de certaines bactéries comme la salmonelle. Et si les bactéries peuvent résister aux conditions extrêmes du vide sidéral elles pourraient se propager dans le système solaire. Après, à l'image de la situation sur Terre, il est possible de trouver des vaccins ou des traitements capables de protéger les spationautes aux risques infectieux.

En outre, l'Homme ne doit pas que survivre, il doit avoir ce sentiment d'exploration continue, il faut faire naître dans l'esprit de l'équipage le désir de Mars. Il est nécessaire qu'il se concentre davantage sur leur mission sur Mars qu'à la Terre mais cela semble utopique quand nous avons passé plus d'une vingtaine d'années sur notre Terre. Nous avons conscience que l'équipage sera exposé à des tourments inédits pour lesquels la science n'a pas encore de réponse. Par exemple, pour la première fois dans une mission spatiale le vaisseau quittera totalement la zone d'attraction terrestre. Les missions Apollo, lors de leurs orbites et leurs alunissages, étaient encore sous influence de l'attraction de la Terre. Dans leur vaisseau, l'équipage va voir à travers les hublots la Terre, s'amincir petit à petit jusqu'à disparaître totalement dans le noir de l'Espace. L'impact psychologique est évidemment nouveau, probablement complexe et dommageable. L'équipage sera en pleine et claire connaissance de sa solitude, envahit par un sentiment d'abandon, personne ne pourra les aider. De plus, les doutes n'ont pas de solutions techniques. Le seul « cordon ombilical » qui les liera à la « mère Terre » seront les communications hasardeuses avec le centre de contrôle. En cas de moindre problème, aucune possibilité de retour direct, les astronautes devront être conscients des risques et de la possibilité de non-retour. Surtout que les effets de l'ennui combinés à ceux de l'inactivité montrent que les astronautes cogitent et angoissent, il suffit de leur faire passer des examens médicaux, tel qu'un encéphalogramme pour voir que certaines zones cérébrales s'expriment davantage.

Déjà aux frontières extérieures de l'atmosphère, les éléments et les rayonnements cosmiques rappellent leurs puissances. Lors de leur sommeil, les astronautes de l'ISS témoignent des gênes occasionnées par les raies lumineuses du soleil, les flashes des explosions solaires et des réfractions de la lumière sur les panneaux solaires. Ils sont aussi exposés aux radiations solaires, les particules solaires et l'Espace sont hautement radioactifs. L'impact des rayonnements

cosmiques sur le corps humain se mesure déjà sur Terre (**voir annexe figure 8**). Nous savons que s'exposer longuement et régulièrement aux rayons ultra-violets du soleil a potentiellement pour conséquence de faire apparaître des cellules cancéreuses comme le mélanome. Dans l'Espace les phénomènes sont démultipliés, et les rayons cosmiques peuvent aller jusqu'à briser et faire muter l'acide désoxyribonucléique (ADN) des êtres vivants et les maladies cancéreuses sont alors inévitables. En effet, sur Terre la magnétosphère nous protège des particules cosmiques, il faudrait donc adapter ce processus à la capsule ou développer des matériaux empêchant les rayonnements de pénétrer. Pour un voyage vers Mars, le risque de cancer mortel peut varier selon le capital génétique des astronautes d'une chance sur dix à une chance sur deux. Des risques qui dérogent à toutes les réglementations sur le travail « des pays puissances spatiales ». Par exemple, la régulation de santé américaine impose que nous ne pouvons pas avoir plus de 3% d'augmentation de chance d'avoir le cancer lors de son travail. La législation française limite l'exposition aux rayons à hauteur de 20 millisievert par an, mais cette limitation sera très largement dépassée pour des missions vers Mars (**voir annexe figure 9**). Par conséquent, les limites de carrières des astronautes sont très restrictives de la part des agences spatiales. Malgré que, les astronautes se disent pour la plupart, prêts à prendre des risques, tel le spationaute français Thomas Pesquet, qui est prêt à prendre 6% de risques en plus. Mais quels risques sommes-nous réellement prêts à prendre pour toucher le sol de Mars ? Pouvons-nous concilier l'exploration avec les exigences sécuritaires et morales de notre époque ?

Aujourd'hui, une solution consisterait à adapter les cellules humaines aux rayonnements, il faut alors identifier et créer des critères génétiques ou établir un génome type pour l'équipage. Puisque nous savons que nos propriétés génétiques de résistance faces aux rayonnements dépendent des génomes des individus. Mais les sociétés actuelles semblent ne pas être prêtes pour des questions d'éthique à modifier le génome de nouveaux nés.

Une autre alternative est l'hibernation, à première vue cela semble absurde, mais si nous examinons en détail les théories et les perspectives associées, ce n'est pas une solution à rejeter. L'hibernation permet en outre, de refroidir le corps, les fonctions métaboliques ralentissent, le corps peut consommer jusqu'à 99% d'énergie en moins. Les problèmes psychologiques n'existent plus, absence de possibles conflits, plus d'ennui ou de soucis d'inactivité, les besoins d'espaces et de ressources alimentaires sont réduits. De plus, les scientifiques ont identifié un phénomène intéressant en phase d'hibernation : le corps humain développe de la radorésistance. Nous pouvons rester allongé pendant six mois alors qu'à la durée équivalente rester allongé aurait des conséquences dramatiques : pertes musculaires et osseuses bien plus

importantes que ce qui arrive aux astronautes actuels dans l'ISS. De plus, un voyageur sidéral endormi pendant 10 années ne vieillirait que d'un an et demi, ce qui offre des perspectives sur les vols habités spatiaux pour des horizons plus lointains. C'est aussi un mécanisme assez universel dans le monde animal, mais il est nécessaire de comprendre celui-ci pour l'adapter à l'Homme. Nous sommes actuellement capables d'éteindre l'organisme, en effet, nous avons identifié les protéines responsables. Seulement, nous n'avons que très peu de connaissances sur les effets de l'hibernation sur l'être humain, notamment quand savoir le réveiller.

De nos jours, pour l'astronaute, l'expérience ultime est de sortir du vaisseau, ces images de l'astronaute contemporain balbutiant autour de la Terre, confortent les deux moteurs de l'exploration. D'un côté la quête insatiable de connaissance où l'humain est un outil nécessaire tant que des machines ne peuvent le remplacer. De l'autre l'expérience humaine, le désir de plonger dans l'inconnu pour trouver du nouveau où le facteur humain est inéluctablement un des obstacles mais qui n'est pas insurmontable.

Troisième partie

Facteurs techniques et technologiques

« Le progrès n'est que l'accomplissement des utopies. »

Oscar Wilde

A la question sommes-nous techniquement capables d'aller sur Mars, la communauté scientifique est divisée. Certains pensent que nous avons atteint le niveau de connaissances nécessaires à un tel projet, d'autres estiment que nos compétences sont encore insuffisantes. Nostalgiques des missions Apollo, des associations de spécialistes comme la Mars Society s'accordent sur le fait que techniquement nous sommes sur le point de concrétiser un tel projet. Toutefois, les questions financières et humaines ne sont encore pas totalement résolues. Cependant, soyons pragmatiques, aller sur Mars nous oblige à poursuivre les recherches sur le plan technologique, notamment avec l'ISS. La volonté des Etats-Unis de retourner sur la Lune avant de se lancer à la conquête de la planète rouge, montre qu'il faut admettre que notre expérience en matière de missions habitées est encore trop fragile. Acquérir la maîtrise des missions lunaires, nous préparerait sans aucun doute à ce qui n'a jamais été aussi périlleux de tenter. Nous y trouverons inéluctablement les réponses aux grandes questions du facteur humain. En effet, solutions techniques et facteur humain sont intimement liés.

Envoyer des Hommes entraîne quelques contraintes au regard de missions robotiques, la première est la gestion simultanée de la nourriture, de l'eau et de l'oxygène. A l'époque des missions Mercury, Gemini et Apollo nous parlions plutôt de « circuit ouvert », la nourriture et l'eau étaient emportées en quantité suffisante et stockées dans des réservoirs. En ce qui concerne l'air (O_2 et N) et le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxygène était stocké dans des réservoirs à haute pression et le dioxyde de carbone était éliminé de l'air avec de l'hydroxyde de lithium combiné à des filtres de charbons. Ensuite, les déchets organiques étaient très souvent évacués à l'extérieur. Alors qu'avec l'avènement des stations spatiales habitées et l'ISS, les techniques ont évolué, tendant vers un « circuit quasi fermé » reposant certes sur des consommables mais aussi de la régénération. Par exemple, l'ISS est perpétuellement ravitaillée en eau et en nourriture. Des expériences sont actuellement menées pour traiter les déchets organiques. L'air est revitalisé par des extracteurs de dioxyde de carbone combinés aux concentrateurs à oxygène qui génèrent de l'air respirable et de l'hydrogène. L'oxygène et l'hydrogène permettent aussi de créer de l'eau par la même occasion. Au 18^{ème} siècle, un certain Lavoisier fit cette célèbre déclaration : « Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme », imaginait-il que trois siècles après, dans l'Espace cela s'applique encore. Toutefois, les missions spatiales habitées tendent à s'aventurer plus loin à travers le système solaire, l'autonomie limitée et la complexité des systèmes d'assainissement de l'air et de l'eau inquiètent véritablement les agences spatiales

mondiales¹. Les stations ou les modules habités sont des espaces fermés ne permettant pas l'évacuation des composés volatiles et des odeurs comme sur Terre. Dès lors, les capacités des machines de purification de l'air sont drastiquement réduites, ce qui peut être très préoccupant pour un voyage « long courrier » vers Mars. Néanmoins, chaque problème a une solution ; d'ailleurs le projet de l'ESA appelé MELiSSA (Micro-Ecological Life Support-Alternative) ambitieux mais prometteur vise à permettre une gestion de la nourriture, de l'eau, de l'oxygène et des déchets organiques concomitants. En effet, sans tenir compte de tous systèmes de recyclage et de ravitaillement, ce projet a pour but de réduire au maximum la quantité de machine et de nourriture à emporter dans la capsule. Typiquement, pour un équipage de quatre à six personnes, 30 tonnes de nourriture devront être embarquées. Mais comment les chercheurs comptent recycler les déchets organiques et le CO₂ afin de produire de l'oxygène, de l'eau et de la nourriture ? En fait, ils tentent de reproduire un écosystème fermé au sein du vaisseau spatial en utilisant des bactéries, des algues, des plantes, des éléments chimiques ainsi que des procédés naturels. Plus particulièrement, le projet MELiSSA cherche à reproduire les activités d'un écosystème complexe tel qu'un lac, où les déchets sont transformés en nutriment ou en gaz indispensables à la vie (**voir figure 10 en annexe**). Les poissons symbolisent l'équipage. Ces derniers produisent en permanence du CO₂ et consomment l'oxygène produit par les plantes qu'ils peuvent manger. Les rejets des poissons s'accumulent au fond du lac dans des zones non oxygénées et où se déroulent des processus de fermentation. La matière organique va être dégradée par des bactéries de manière à reconstituer les éléments qui permettent à la photosynthèse d'avoir lieu. Pour se faire, plusieurs compartiments sont assimilés à des tâches bien précises. A la base, les déchets vont progressivement être transformés. Ensuite, le compartiment des plantes et des algues va produire nourriture, oxygène et eau (**voir figure 11 en annexe**). Nous pouvons voir sur cette figure « la boucle MELiSSA » : elle est composée de cinq compartiments. Tout commence avec l'équipage qui produit des déchets et du CO₂. Le compartiment C-I est constitué de bactéries qui vont dégrader la matière organique et transmettre le produit de cette dégradation à un second compartiment (C-II) occupé par un autre groupe de bactéries. Ce sont les bactéries photohétérotrophiques, c'est-à-dire qu'elles utilisent la lumière comme source d'énergie et aussi les acides gras volatiles pour croître, qui produisent de la biomasse. Puis, elles poursuivent le processus de dégradation de la matière organique. Ensuite, le troisième compartiment (C-III) occupé par des bactéries nitrifiantes, c'est-à-dire

¹ "D'autant plus que l'environnement climatique de la Station, unique en son genre, peut radicalement affecter le comportement des matériaux par rapport à ce qui est observé sur Terre", alerte David Howard, directeur du programme au Marshall Space Flight Center.

provoquant la formation de nitrate. Le nitrate constitue l'engrais dont ont besoin les organismes photosynthétiques pour produire de l'oxygène, de la nourriture et de purifier l'eau. Ces organismes sont contenus dans le compartiment C-IVa et dans le compartiment C-IVb, il est possible de cultiver des plantes qui par photosynthèse produiront de l'oxygène et pourquoi pas, cultiver des plantes comestibles comme de la salade. Les bactéries qui retiennent le plus l'attention des scientifiques sont les bactéries telles que la cyanobactérie *Arthrospira* ou Spiruline. Ces bactéries utilisent le CO₂ et l'eau ainsi que la photosynthèse pour produire de l'oxygène mais elles peuvent également servir de nourriture riche en vitamines et minéraux. La Spiruline peut également fixer le dioxyde de carbone, elle résiste bien aux rayonnements cosmiques et, est un très bon complément à l'alimentation quotidienne des astronautes grâce à sa forte teneur en protéines. Cependant, pour que cet écosystème fonctionne sans anomalie particulière, les scientifiques doivent identifier les conditions environnementales dans lesquelles les bactéries vont évoluer pour détecter l'instabilité métabolique, les contaminants microbiens et le transfert horizontal de gènes dans la boucle. En effet, les conditions physiques dues à l'Espace ainsi que les processus évolutifs peuvent modifier la réponse bactérienne. Ces dernières pourraient mettre en péril la stabilité de l'écosystème en le contaminant. C'est pourquoi, des systèmes d'alertes précoces sont en cours de développement pour détecter les organismes contaminants et ainsi éviter une infection. Si ce projet est concluant, et si nous trouvons un moyen de le miniaturiser, un des problèmes critiques parce qu'essentiel à la vie de l'équipage serait résolu et une mission vers Mars ne serait plus inenvisageable. Maintenant, si ce concept est pour telle ou telle raison non satisfaisant, il faudra se résoudre à développer nos techniques actuelles d'ECLSS (Environmental Control and Life Support System), notamment présentes dans l'ISS. D'ailleurs, certains éléments, comme le contrôleur de température et d'humidité, conservant une pression proche d'un bar et veillant à ce que les proportions d'oxygène et d'azote soient respectées, seront toujours nécessaires dans le cadre d'une mission habitée impliquant le projet MELiSSA. De même, les systèmes de gestion d'urgence, composés de systèmes de détection et de lutte contre les incendies, d'appareils respiratoires d'urgence et de système surveillant l'évolution de la pression pour se prémunir d'une dépressurisation accidentelle. Tous ces systèmes devront être interconnectés, capables de fonctionner en temps réel et de s'adapter à toutes les situations à risque. Le but étant que les astronautes soient le plus assistés possible et prévenus le plus rapidement aux vues des délais de communications. Tous sont en cours d'utilisation dans l'ISS et continuent d'être améliorés.

Avant de penser à ce que nous emporterions à manger et à boire, il faut avant tout « s'arracher » du sol terrestre, pour une mission habitée vers Mars, comptez une masse totale d'au moins 500 tonnes (à peu près la masse de l'ISS). Alors bien évidemment, il n'est pas question de lancer autant en une seule fois. Le plus réaliste est de fractionner les lancements pour arriver à des mises en orbites basses d'une centaine de tonnes avec des lanceurs lourds comme nous le faisons dans les années 70 avec la Saturn V. La NASA teste depuis 2011, une nouvelle génération de lanceurs lourds avec le SLS (Space Launch System) qui permettrait de satelliser les éléments d'une station spatiale martienne et ainsi les assembler en orbite. De plus, plusieurs des composants clés du SLS, tels que les propulseurs d'appoint, la structure du premier étage et les moteurs-fusées RS-25 sont dérivés de la navette spatiale américaine. Aussi, deux boosters d'appoints ont été ajoutés pour accroître la poussée au décollage. Donc, puisque la principale difficulté, quant aux développements des lanceurs lourds est plus budgétaire que technique, le fait de réutiliser des technologies passées permet de faire des économies sur les travaux de recherches et de développements.

Ci-après les caractéristiques générales du lanceur SLS comparé à la Saturn V :

Hauteur	Diamètre	Masse au décollage	Étages	Charge utile ²
121 m	8,4 m	3 000 tonnes	2	130 tonnes en orbite basse, 30 tonnes en orbite lunaire
Hauteur	Diamètre	Masse au décollage	Étages	Charge utile
111 m	10,1 m	3 038 tonnes	3	140 tonnes en orbite basse, 40 tonnes en orbite lunaire

² Données théoriques puisque le lancement de la SLS est prévu pour 2020

Ce lanceur est initialement développé dans l'optique d'un voyage habité vers Mars à l'horizon 2035. Il a en fait pour objectif de placer en orbite le nouveau vaisseau spatial Orion que la NASA a développé pour les vols habités et ainsi envisager une mission habitée vers Mars. Il est important de noter que trois versions doivent être développées avec une capacité de mise en orbite basse s'échelonnant entre 70 et 130 tonnes. Cependant, le prix unitaire d'un lanceur SLS est compris entre 500 millions de dollars et 1 milliard de dollars ce qui implique que la NASA n'utilisera ce lanceur que pour les grandes occasions et nécessite d'accroître nos connaissances en matière de lanceurs réutilisables. Si nous comparons la fusée SLS à la fusée Saturne V qui date du début du programme Apollo de 1968, nous remarquons qu'elles sont très identiques. Cependant, la Saturne V était capable de fournir une puissance suffisamment importante pour s'affranchir de la gravité terrestre, et de ce fait d'envoyer les premiers Hommes sur la Lune, nous espérons que le SLS l'égale réellement sur ce point. Néanmoins, elle consommait énormément d'énergie (81 000 litres de carburant et 13 200 litres d'oxygène en 2 minutes et 30 secondes) et coûtait quelques 2,1 milliards de dollars environ, soit deux fois plus que le SLS. Le lanceur SLS, aux vues des caractéristiques annoncées par la NASA, sera plus puissant que la Saturne V et permettra donc l'envoi d'humains sur Mars. Il doit aussi moins consommer, ce qui dans la conjoncture économique et environnementale actuelle n'est pas négligeable. Nous remarquons que le développement de ce lanceur arrive très tardivement, après la fin du programme Apollo, car « la fougue » et le contexte politique de l'époque dans lequel a émergé ce programme ne sont plus les mêmes.

En ce qui concerne le module habité, Orion semble le plus inspirant, c'est un vaisseau spatial de la NASA destiné à envoyer des équipages au-delà de l'orbite basse. Il a été développé en association avec le SLS dans le cadre du « programme constellation » dont l'objectif est d'envoyer des Hommes sur Mars d'ici 2035. Cependant, le programme est abandonné en février 2010 pour raison budgétaire, toutefois, la NASA a maintenu le développement du module pour de futures missions de survol de la Lune, astéroïdes et peut-être le transport de l'équipage de la Station Spatiale Internationale. Orion sera placé en orbite par le lanceur SLS et, est conçu pour transporter quatre personnes pour une mission de trois semaines au-delà de l'orbite terrestre basse. Au niveau de son architecture, il reprend celle de la capsule Apollo avec un module de commande en forme de cône contenant l'habitacle ainsi qu'un module de service. Pour se fournir en énergie, il utilise des panneaux solaires et dispose d'un volume habitable plus que doublé par rapport au vaisseau Apollo. Orion, réutilisable, est conçu pour se poser sur l'eau. Cette notion est très importante d'un point de vue économique. En effet, réutiliser la capsule

permet de limiter les coûts de production d'une nouvelle capsule car celles utilisées seront réparées, contrôlées pour ensuite être remises en service. De plus, Orion pourra compter sur ses moteurs pour s'orienter dans l'Espace. En effet, une fois que la capsule aura quitté les contraintes de la gravité terrestre, les 33 moteurs dont il dispose permettront de le manipuler sur tous les axes grâce à la poussée fournie par ces derniers. Le moteur principal est capable de fournir une puissance de 25,7 kN ainsi que de pivoter en lacet et en tangage. Huit propulseurs sont fixés au bas du module de service, en cas de problème du moteur principal ou pour une correction d'orbite. Chaque propulseur est capable de fournir une puissance 490 N. Enfin, il y a 24 petits moteurs qui, si Orion se trouve en position fixe peuvent être déclenchés individuellement pour le déplacer dans différentes directions et le faire pivoter dans n'importe quelle orientation. Le combustible utilisé est stocké dans quatre réservoirs d'une capacité de 2000 L chacun, pressurisé à 25 bars.

La capsule Orion est un progrès dans le milieu spatial comparé au module Apollo. En effet, il permet d'accueillir à son bord de quatre à six astronautes alors que le module Apollo ne pouvait en accueillir que trois. De plus, le volume pressurisé a presque été doublé, et l'espace habitable a été augmenté d'environ trois mètres. Tout cela avec une hauteur inférieure, onze mètres pour le module de commande Apollo contre sept pour la capsule Orion. Enfin, l'autonomie est passée de 14 jours à 21 jours. Cela reste encore, largement insuffisant pour envisager un voyage en direction de Mars qui durera au minimum six mois.

Voici quelques caractéristiques :

Atmosphère	Volume Pressurisé	Espace Habitable	Delta-V	Autonomie
Oxygène/azote	19,56 m ³	8,95m ³	1340m/s	21 jours
Hauteur	Diamètre	Masse totale	Ergols	Puissance électrique
Environ 7m	5,02m	21,25 t	7,9 t	11kW

Il est vrai que cette capsule seule ne suffit pas pour un vol habité vers Mars, nous parlions précédemment d'une masse totale de 500 tonnes. En outre, nous pouvons penser à un assemblage de plusieurs modules Orion ainsi que de modules semblables à ceux de l'ISS, dans le but de recréer une station spatiale. Après la construction de la station, nous enverrions des cargos de ravitaillements pour l'alimenter en nourriture, en eau, en oxygène, en matériel et en carburant. Nous supposons que la combinaison de plusieurs capsules Orion permettrait, grâce à leurs modules de service, d'assurer la propulsion nécessaire pour rejoindre Mars.

Une fois que la première phase (décollage et assemblage) est assurée, il nous faut maintenant nous échapper de l'attraction terrestre et avoir une propulsion suffisante pour atteindre Mars. Dans les années 70, le module de commande Apollo était propulsé par un moteur-fusée SPS à ergols liquide. Assurant certes une poussée satisfaisante (91kN), la nécessité d'utiliser des ergols est contraignante et l'impulsion spécifique³ de ce type de moteur est très faible de l'ordre de 300-500 secondes.

Depuis les prémisses de l'astronautique, ce n'est pas le fonctionnement de la fusée ou la construction en tant que tel qui est complexe, mais son utilisation : placer un satellite en orbite basse ou envoyer une sonde sur Mars n'exige pas les mêmes vitesses de libération pour s'échapper de l'attraction terrestre. La consommation de carburant en est immédiatement impactée : si nous utilisons du carburant pour produire la poussée nécessaire à la libération, il faut que celui-ci échappe aussi à la gravité, donc, utiliser du carburant pour propulser le carburant lui-même, et plus nous voulons aller loin, plus la quantité exigée augmente. C'est un véritable casse-tête pour les ingénieurs, surtout qu'aujourd'hui le carburant représente en moyenne quasiment neuf dixième de la masse de la fusée, ce qui limite fortement la masse de la charge utile que nous pouvons placer en orbite. De toute manière, plus la charge utile est lourde, plus la quantité de carburant nécessaire sera importante et nous retombons dans le « cycle infernal » précédent. Ce raisonnement nous pousse, pour des raisons économiques et pratiques, à trouver d'autres moyens de propulser les engins spatiaux avec des moteurs plus légers sans perdre en autonomie et en portée et avec des quantités de carburant plus faibles.

Avec la propulsion ionique : ni combustion, ni réaction chimique, aucunes pièces mobiles, aucun besoin de palier à des contraintes thermiques et mécaniques comme un moteur de fusée classique. Ce qui limiterait les risques d'explosions et d'incendies. Les moteurs ioniques semblent donc efficaces et rentables, même si nous le verrons après qu'ils présentent aussi des « faiblesses ». De nos jours, plusieurs projets sont en cours d'élaboration, d'ailleurs, certaines sondes spatiales en sont équipées mais cela reste encore semi-expérimentale, la propulsion ionique ne permet pour l'instant que la correction de trajectoires et le contrôle d'orientation ou de très faible poussée. En effet, malgré une impulsion spécifique en moyenne dix fois plus élevée que les moteurs à propulsion chimique classiques, permettant de réduire la masse de l'engin spatiale et diminuer la quantité d'ergols à emporter, la poussée est très faible, au plus quelques newtons.

³ $I_{\text{impulsion spécifique}} = \frac{F}{q \times g_0}$, où F désigne la poussée, q le débit massique et g_0 l'accélération de la pesanteur

Néanmoins, la poussée est constante et continue, les particules éjectées sont précisément dirigées améliorant la poussée produite. Dans le vide, en absence de fluide visqueux tel que l'air, rien ne nous freine, c'est-à-dire qu'une fois propulsée la sonde ne s'arrête pas et une faible poussée produit une force suffisante à accélérer l'engin. L'accélération est certes lente, mais constante, continue et très longue. Après plusieurs mois, une sonde peut augmenter sa vitesse de 5 à 10 km par secondes, ce qui est loin d'être négligeable pour des voyages interplanétaires. Si nous poursuivons les recherches, il est envisageable que de tels moteurs pourraient atteindre, forts d'une accélération durable, des vitesses de l'ordre de 10% de la célérité de la lumière. Donc, pour un voyage vers Mars, ce type de propulsion, nous permettrait de réduire considérablement les durées de voyages. La principale contrainte est l'énergie à produire pour assurer le fonctionnement de ce moteur. En effet, le moteur ionique utilise le principe physique suivant : une particule chargée dans un champ électrostatique subit une force proportionnelle au champ électrique et à sa charge électrique. Cette force permet d'accélérer la particule comme le montre l'équation 1, mais cette force dépend de l'intensité du champ électrique.

$$F = qE \xleftrightarrow[\text{Loi de Newton}]{} a = \frac{q}{m} E$$

Equation 1

Pour être plus performant, le champ électrique est couplé à un champ magnétique et exploite les principes de l'électromagnétisme comme l'effet Hall⁴, la force prend alors l'expression suivante :

$$\vec{F}_{Lorentz} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Equation 2

Pour produire un champ magnétique et champ électrique, les panneaux solaires restent aujourd'hui le moyen le plus efficace pour des petites sondes mais si nous voulons envisager des missions plus lointaines vers Mars, les panneaux solaires ne suffiront à propulser un engin de plusieurs tonnes, c'est pourquoi la NASA qui travaille par ailleurs sur le moteur ionique depuis les années 1950, explorent les possibilités d'embarquer des générateurs thermo-

⁴ Lorsqu'un courant traverse un barreau en matériau semi-conducteur (ou conducteur), et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension, appelée tension Hall, V_H , proportionnelle au champ magnétique et au courant apparaît sur les faces latérales du barreau et donne naissance à un champ électrique E_H . D'après *techno-sciences.net*

nucléaire assurant l'énergie nécessaire à faire fonctionner les moteurs d'une part, mais aussi de fournir de l'électricité à la station spatiale d'autre part, (sous réserves de risques).

Depuis des années, un projet retient l'attention de la communauté scientifique : le moteur plasma, qui selon le physicien et astronaute Franklin Chang Diaz serait le moyen qui permettrait d'envoyer le plus rapidement des Hommes sur Mars. Un moteur plasma fonctionne de la manière suivante : un gaz est porté à une très haute température, les atomes ainsi transformés sont ensuite accélérés par un champ magnétique ce qui permet d'assurer une poussée constante et continue. La vitesse d'éjection en sortie de tuyère est d'environ 18 000 km/h. L'un des points forts du moteur plasma par rapport à un moteur chimique classique est son autonomie qui est totale. Cependant, un tel moteur n'offre pas une puissance nécessaire pour déplacer un vaisseau spatial en dehors de l'attraction terrestre. C'est pourquoi, il faudrait combiner un petit réacteur nucléaire avec ce moteur pour apporter la puissance électrique nécessaire mais cela n'a jamais été testé ou bien, utiliser un module de propulsion chimique dont nous nous séparerions. Ce type de propulsion résoudrait une grande partie des problèmes liés aux facteurs humains. Nous nous intéresserons plus particulièrement au concept de propulsion magnéto-plasmique à impulsion spécifique variable ou VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) qui est un moteur à plasma. Il utilise des champs et des rayonnements magnétiques pour chauffer, ioniser et accélérer un propergol vaporisé (hydrogène, hélium). Ce moteur est capable de fonctionner comme un propulseur chimique ou comme un moteur ionique, il suffit de modifier ses paramètres de fonctionnement. De plus, ce moteur se base sur la propulsion électrique. En effet, l'induction électromagnétique permet de chauffer le gaz suivi de la détente du gaz, cela caractérise la propulsion électrothermique. Ensuite, le plasma est ionisé puis accéléré dans un champ magnétique, c'est la propulsion ionique. Enfin, le plasma est confiné, le guidage et le contrôle du jet externe se fait par champ magnétique ce qui s'identifie à la propulsion électromagnétique (**voir figure 12 en annexe**).

Cependant, un tel moteur est très « énergivore » c'est-à-dire qu'il nécessite environ 200 kW. Il existe aujourd'hui aucun moyen de fournir une telle quantité d'énergie dans l'Espace. La seule solution pour le moment serait un réacteur nucléaire identique à ceux des porte-avions. Le moteur VASIMR pourrait donc être le candidat idéal pour emmener les premiers Hommes sur la planète rouge si, préalablement, les défis qui le contraignent aujourd'hui, sont résolus.

Maintenant, supposons que nous avons réussi à décoller et à quitter l'attraction terrestre. Cependant, il nous faut rejoindre Mars sans encombre, et déjà, les astronautes ressentent les effets de l'apesanteur sur leurs corps, pour les contrer, les scientifiques évoquent la possibilité d'embarquer à bord du vaisseau une centrifugeuse à rayon court. Dans cette dernière, les spationautes devront faire leurs exercices physiques pendant une durée d'une heure et cela deux fois par semaine. Encore plus audacieux, il serait possible de contrer le phénomène d'apesanteur, en mettant en rotation le vaisseau autour d'un axe. Cette idée a émergé du pionnier de l'astronautique, le russe Constantin Tsiolkovski. Cependant, cela ne suffirait qu'à atténuer un minimum les effets de l'apesanteur, il faudrait les combiner à une pratique sportive régulière. La valeur de cette gravité artificielle pourrait se rapprocher de celle de Mars au fur et à mesure de l'avancement du voyage. Cela permettrait une meilleure adaptation des spationautes lors de leur arrivée sur Mars. Il faut ajouter à cela, le fait que, si un spationaute se déplace latéralement à la rotation du vaisseau, deux forces (centrifuge et de Coriolis) s'appliqueront à son corps, ce qui amplifiera le problème. De surcroît, certains problèmes physiologiques apparaîtront dus notamment, à la force de Coriolis induite. Cette dernière pourrait causer des désorientations sur le système vestibulaire des membres de l'équipage. Par conséquent, il faudra apprendre aux spationautes à évoluer dans un milieu en perpétuelle rotation (savoir se déplacer avec, contre ou perpendiculairement la rotation). De plus, nous ne savons pas si le passage d'un module mobile à immobile a un impact sur le corps humain. En effet, plus une partie amovible est proche de l'axe autour duquel elle tourne plus les complications s'accroissent et réciproquement. Pour développer ce projet, qui n'est pas incongru, nous devons le tester avec l'ISS.

L'un des principaux problèmes que nous avons évoqué en deuxième partie concerne les radiations dues aux éruptions solaires et aux rayonnements cosmiques. Lors des missions Apollo, la NASA assurait la protection des astronautes à l'aide d'un système de radioprotection composé d'un scaphandre et d'un revêtement de la cabine adaptés. Les matériaux utilisés pour le vaisseau Apollo, ont été étudiés et sélectionnés selon leur capacité à réduire les doses d'irradiation. De plus, la répartition des différents équipements, de l'appareillage et des réserves de bord a été pensée de telle sorte que la défense de la capsule soit augmentée. Cependant, la protection fournie par ce système n'est pas uniforme. En effet, les différentes parties de la cabine sont plus ou moins exposées aux radiations. De surcroît, un système manuel de contrôle d'attitude avait été mis en place pour permettre à l'équipage d'orienter le vaisseau spatial en

interposant le module de service protégé contre les radiations entre les astronautes et les rayonnements cosmiques ou solaires.

De plus, des études sur le module de commande et de service (CSM) Apollo, ont montré que les doses de rayonnements reçues dépendaient de la géométrie de celui-ci. **La figure 13 en annexe**, montre la distribution de la surface du CSM et des doses en pourcentage en fonction de la densité de surface. Nous pouvons voir que les régions du vaisseau, représentant 5 grammes/cm² ou moins, couvrent seulement 9% de la surface du vaisseau ; à travers cette région des « 9% », nous obtenons approximativement 60% de réduction de doses. Cette fine région, est située derrière la tête de l'astronaute et entre les cinq hublots. Une vue en coupe de la distribution de l'épaisseur à travers la région des hublots, est insérée à **la figure 13**. Cette figure est importante, parce qu'elle démontre que si le besoin se fait sentir de réduire les doses en dessous des normes imposées alors des protections pourraient être placées dans une région assez restreinte fournissant un moyen efficace de réduction des doses. Ce point est démontré avec **la figure 14**, nous pouvons voir qu'approximativement 140 pounds (64 kg) de matériels dans ces fines régions peuvent réduire les doses de 40%. La raison de l'aplanissement rapide de la courbe près du point « 50% », est la contribution de doses d'autres régions du vaisseau. De plus, **la figure 15 en annexe** est remarquable, elle présente le ratio anisotropique/isotropique de doses en fonction de la région de pénétration des champs de radiations selon différents angles de direction du CSM. Elle montre que l'orientation angulaire du module n'est pas négligeable en termes de rayonnements reçus. D'ailleurs, la direction privilégiée ou non des rayonnements semble dépendre de l'orientation angulaire. Par exemple, nous pouvons lire que pour un angle polaire compris entre 20° et 70° environ, le rapport est strictement supérieur à un, les doses sont issues de rayonnements ayant, principalement, des directions privilégiées. Ce qui signifie qu'il nous faudra aussi étudier les doses reçues en fonction de l'orientation du vaisseau spatial destiné à un vol vers Mars.

Donc, pour lutter contre ce paramètre, il faut placer le maximum de matériel possible entre les sources de rayonnements et l'équipage, si possible utiliser des matériaux avec une forte teneur en hydrogène, **la table 1 en annexe** rapporte les valeurs de réduction des doses en pourcents de quelques composés chimiques. Et il sera nécessaire d'étudier la géométrie du vaisseau afin de le rendre le plus viable possible. Aussi, il faut créer une zone de sécurité à l'intérieur du vaisseau dans laquelle les spationautes se réfugieraient en cas d'éruptions solaires. En effet, même si aujourd'hui, les éruptions solaires sont observées et surveillées afin de permettre une plus grande anticipation, elles restent extrêmement dangereuses pour l'Homme. Il est indispensable

de protéger les astronautes de ces phénomènes puisque le flux de protons envoyé est plus important et représente une dose de 0,38 Sv. Pour réfléchir ces rayons, il faut des matériaux à forte teneur en hydrogène, comme par exemple l'eau. Elle constituerait une excellente protection de par sa masse volumique. Si un tel système est mis en place cela limiterait la dose reçue à 0,055Sv. Encore faut-il conserver de l'eau à l'état de glace, plus efficace contre les rayonnements, dans un vaisseau exposé au vide. Il serait donc nécessaire de recréer les conditions (Pression, Température) pour que l'eau se trouve à l'état désiré.

Un autre projet est en cours de développement par le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), nommé SR2S (Space Radiation Superconducting Shield), il a pour but de créer un champ magnétique autour du vaisseau pour permettre les vols spatiaux de longue durée. Cela consisterait à concevoir des aimants supraconducteurs à la fois très puissants et très légers, mais également efficaces à une température légèrement supérieure au zéro absolu. Un matériau s'impose comme le plus efficace pour ce type d'aimant : le di borure de magnésium qui est un supraconducteur de type II. C'est-à-dire qu'un champ magnétique croissant pénètre progressivement à l'intérieur du matériau. Cependant, un aimant est nettement plus lourd que de l'eau, il nécessite d'être refroidi et il émet un rayonnement magnétique, il ne faut pas que cela impacte l'équipage.

Nous avons développé en fin d'annexe une tentative d'illustration des effets d'un bouclier magnétique.

Enfin, après avoir fait face à tous ces facteurs, il nous faut encore s'insérer dans une orbite martienne et atterrir sur la planète rouge. L'atterrissage sur la planète rouge est encore aujourd'hui un problème qui reste à résoudre et actuellement, nous ne sommes pas, à ce jour, capables de faire atterrir un objet d'une masse de plus de 10 tonnes sur Mars (le rover *Curiosity* à une masse d'une tonne). Le principal défi est de contrer la vitesse ($\sim 10 \text{ km/s}$) lors de l'entrée dans l'atmosphère martienne d'un véhicule très lourd. Il est important de noter que même un bouclier thermique de 25 mètres de diamètre conjugué à d'immenses parachutes n'assurerait pas un freinage suffisamment important pour faire atterrir dans de bonnes conditions la capsule, Mars possédant une atmosphère très fine. Pour faire face à la vitesse d'entrée atmosphérique, il faudrait ralentir la capsule au cours de sa descente avec des rétrofusées plus développées que celles que nous utilisons pour envoyer des rover sur Mars.

A titre comparatif, lors de la mission Apollo 11, l'alunissage du module comportait trois phases. La première était une phase de freinage qui a pour but de diminuer la vitesse horizontale du

module lunaire. La seconde phase consistait à repérer le lieu d'atterrissage en inclinant le module d'une cinquantaine de degrés. La dernière était tout simplement l'atterrissage, sachant que sur la Lune les parachutes sont inutiles, le freinage était obtenu exclusivement par les moteurs de descente. Pour qu'il se déroule sans encombre, le module doit être mis dans une position verticale par rapport à la surface sur laquelle il va atterrir, tout en réduisant sa vitesse cette fois-ci verticale et ainsi se poser sans risque. Comme pour un atterrissage sur Mars, la vitesse d'alunissage du module était un problème. En effet, si la vitesse ne parvenait pas à diminuer, le module ne se poserait pas au lieu prévu. Sur Mars, si nous ne parvenons pas à la réduire suffisamment, le module risque de s'écraser à la surface de la planète. De plus, la gestion du carburant est un problème majeur, tout comme pour Mars, car chaque action devait être contrôlée sans quoi la mission aurait été un échec. Déjà, dans les années 1960, la NASA a imaginé un schéma (**voir figure 16 en annexe**) pour l'atterrissage sur Mars qui s'inspire des missions lunaires Apollo, nous pouvons voir que l'idée du parachute combiné à des moteurs de descentes était dès lors envisagée.

Toutefois, en février 2018, la NASA a présenté une solution qui pourrait rendre l'atterrissage à la surface de Mars envisageable. Il s'agirait d'utiliser ce que nous pourrions apparenter à un bouclier magnétique. Le fonctionnement est le suivant : un champ magnétique d'environ 0,05 Tesla est produit à partir du vaisseau. Nous injectons un plasma basse température à l'intérieur, ce dernier va capturer des particules de l'atmosphère martienne ce qui va permettre de ralentir le vaisseau. Cette solution présente de multiples avantages. En effet, le poids de l'électro-aimant d'une tonne peut remplacer un bouclier thermique de 20 tonnes. De plus, on peut se passer totalement d'un bouclier thermique puisque le plasma va absorber tout le choc thermique. Enfin, le bouclier magnétique est contrôlable et donc ajustable en fonction des conditions atmosphériques et il permet des vitesses d'aérocapture⁵. Actuellement, avec un bouclier thermique conventionnelle, l'aérocapture n'est pas impossible, mais un seul bouclier thermique pour la mise en orbite et l'atterrissage serait très lourd et nécessiterait plus de carburant pour les rétrofusées. Alors que deux boucliers permettraient certes d'éjecter le plus lourd utilisé pour l'aérocapture et ne requerrait pas de dispositif de freinage supplémentaire mais globalement exigerait plus de masse à envoyer vers Mars. Aussi, avec un seul bouclier se pose la question de la propulsion post-aérocapture, le système de propulsion étant généralement placé derrière

⁵ C'est une technique qui peut théoriquement être utilisée par un vaisseau qui s'approche, sur une trajectoire hyperbolique, d'un corps céleste pour le placer en orbite autour de celui-ci, en utilisant uniquement la traînée générée par la traversée de l'atmosphère de cette planète et sans avoir recours à ses moteurs pour décélérer, allant bien au-delà de ce que peut faire un bouclier physique. *Lu sur Wikipédia*

le bouclier, si nous ne l'éjectons pas, comment assurer la poussée permettant de se placer en orbite ? L'utilisation duale du bouclier thermique reste à ce jour problématique.

L'équipe qui travaille sur le projet de bouclier magnétique a calculé qu'un aimant de 2,5 mètres serait suffisant pour générer un bouclier magnétique de 21 mètres de rayon qui pourrait alors servir à l'aérocapture dans l'atmosphère martienne d'une charge utile de 30 tonnes. Cependant ce dispositif est encore en phase d'étude et se doit d'être testé avant d'être approuvé et validé, mais s'il s'avérait concluant, il résoudrait les problèmes de mise en orbite et de l'atterrissage.

Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition de mesurer les difficultés pour un vol habité vers Mars, en se demandant si un vol comme celui-ci constitue en tant que tel, un concentré de défis sur le plan humain et technologique et de quelles manières les surmonter.

Il a fallu dans un premier temps exposer les motivations pour ce type de missions, en examiner les caractéristiques inhérentes et ne sélectionner que les plus pertinentes.

Au moyen de l'analyse historique d'archives, de documents récents et aussi, d'articles prospectifs, il a été possible de se lancer dans ce travail rigoureux. Ainsi, la manifestation de retombées pluridimensionnelles telles qu'économique ou cognitive dénotent de fait, une volonté de les supplanter aux quelques réticences persistantes de nature financière, humaine et technique.

Il convenait alors, de s'intéresser à l'ergonomie et à la santé de l'Homme, modifiées dans un environnement tel que l'Espace et de savoir alors comment l'adapter.

Le choix a été fait de s'appuyer sur les situations au travers de l'ISS, permettant ainsi de confronter problèmes et solutions. C'est pourquoi, l'établissement d'une station habitée en permanence, a permis d'établir et/ou préciser les effets de séjour spatial de longues durées, et d'en trouver des « remèdes ». Pour établir le plan de vol, d'un voyage habité vers Mars, l'ISS est, et restera indispensable afin de poursuivre les recherches. Elle est à ce jour le seul moyen de tester divers expériences ou projets, exposés au vide sidéral. Puisque, nous avons déjà résolu certains problèmes, nous trouverons sans aucun doutes les dernières clés pour un tel vol, grâce à l'ISS.

Il s'imposait enfin, de se préoccuper de l'aspect technique et aux limites qu'il induit, pour décoller en direction de Mars.

Au cours de l'histoire de la conquête spatiale, l'Homme a dû se transcender pour développer sans cesse ses capacités techniques en matière d'astronautique. Un vol habité vers Mars sera la plus ambitieuse et la plus dangereuse des missions jamais tentées à ce jour mais sans doute le meilleur moment pour les concrétiser. Maintenant, malgré nos efforts, les recherches restent pour la plupart au stade d'idées, au mieux de projets. Peut-être vaut-il mieux être patient et dans un premier temps « viser la Lune » pour parfaire nos connaissances dans le but d'être prêts pour

Mars. D'ailleurs, à partir de quelques projets certes non exhaustifs, décrits à la fin de ce mémoire, il est possible de saisir, en dépit de progrès tout de même accomplis, les difficultés qu'ils restent à surmonter. Contrastant avec la volonté de quelques irréductibles de croire inlassablement au vol habité vers Mars dans les prochaines années.

Aussi, une fois que nous aurons surmonté tous ces défis, il faudra gérer ceux qui, inéluctablement, surviendront lorsqu'il s'agira de rester en vie à la surface de Mars et si ce n'est pas une mission de colonisation, le trajet retour. Ce travail de mémoire se voulait principalement descriptif sur l'envoi d'un équipage vers Mars, mais dans cette nouvelle perspective, il serait pertinent de procéder à une étude sur la continuité d'une telle mission, qui pourrait être d'autant plus inédite que le vol habité lui-même.

Sources

Sciences Grand Format, Les cobayes du Cosmos, confidences d'astronautes, diffusé sur France 5 le 22 novembre 2018 à 20h55 réalisé par Jean Christophe Ribot

R.Heidmann, A.Souchier, J-F Pellerin, P.Brisson et Association planète Mars, *Embarquement pour Mars*, A2C medias, 2017, 223 pages

Executive Intelligence review, *How the Apollo program produced economic wealth*, Volume 14, numéro 21 du 22 mai 1987

National Aeronautics and Space Administration, U.S. Air Force, U.S. Atomic Energy Commission, NASA SP-71, *Second symposium on protection against radiations in space*, 1964, 551 pages

Eligar Sadeh, Department of Space Studies, University of North Dakota, *Societal Impacts of the Apollo Program*, 1995, 69 pages

Thomas Pesquet : *objectif Mars*, diffusé sur Arte en août 2017 réalisé par Alain Tixier et Vincent Perazio

National Aeronautics and Space Administration, *Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Systems on the International Space Station*, NASA/TM-1998-206956/VOL1, 304 pages

F.R. Chang Díaz, J.P. Squire, A.V. Ilin, G.E. McCaskill, T.X. Nguyen, D.S. Winter, A.J. Petro, G.W. Goebel, L.D. Cassady, K.A. Stokke, C.E. Dexter, T.P. Graves, L. Amador Jr., J.A. George, *The Development of the VASIMR Engine*, Advanced Space Propulsion Laboratory NASA, Johnson Space Center, Houston, 6 pages

Jean Marc-Trochon, *Les États-Unis à la conquête de la lune*, Vingtième siècle Revue d'histoire, n°57, 1998, 18 pages

David S.F.Portree, *Humans to Mar : Fifty Years of Mission Planning, 1950-2000*, NASA SP-2001-4521, 164 pages

Centre National d'Études Spatiales : <http://www.cnes.fr> ; National Aeronautics and Space Administration: <https://www.nasa.gov/> ; European Space Agency: <http://www.esa.int> ; Commissariat à l'énergie atomique : <http://www.cea.fr/>

Annexes

~~scaphandre aouda~~

- ✓ -Problème de nourriture (Avoir un écosystème auto-suffisant)
- Supporté le 0 G sur une durée de 6 mois. ✓
- L'énergie (Oxygène, l'eau, carburant, électricité, la propulsion)
- L'exposition aux rayons ✓
- Facteurs humains (physiologie, psychologie) ✓
- ~~X~~ -Gestion des problèmes techniques
- ~~X~~ -Atterrissage sur Mars ✓
- ~~X~~ -Gestion de l'espace de la capsule, matériel emporté
- ~~X~~ -Avoir un point relais (ISS ou orbite Mars)
- ~~X~~ - Budget/Politique (l'intérêt public, le soutien de la population, Mission nationale ou internationale) ✓
- ~~X~~ -Dispositif de communication « stable »
- ~~X~~ -Questions de la sécurité (cf Apollo 13)
- ✓ -Capsules (Orion, red dragon)
- ~~-Repartir depuis Mars ?~~
- ~~-Etude probabiliste de la collision avec une météorite~~
- ✓ -Décollage sur Terre (SLS) ✓

Comment survivre ?

Supporter faible gravité au tiers de la terre

produire nourriture grâce à un écosystème autonome (comment compenser les nutriments manquants) ✓

eau ✓

fine atmosphère, donc compliqué pour les drones et l'exploration

faible champ magnétique

respirer

supporter le fait d'être 76 million de km de la terre

pas d'aides apportées en cas de problème

délais entre les communications 20 min

Axes de recherches

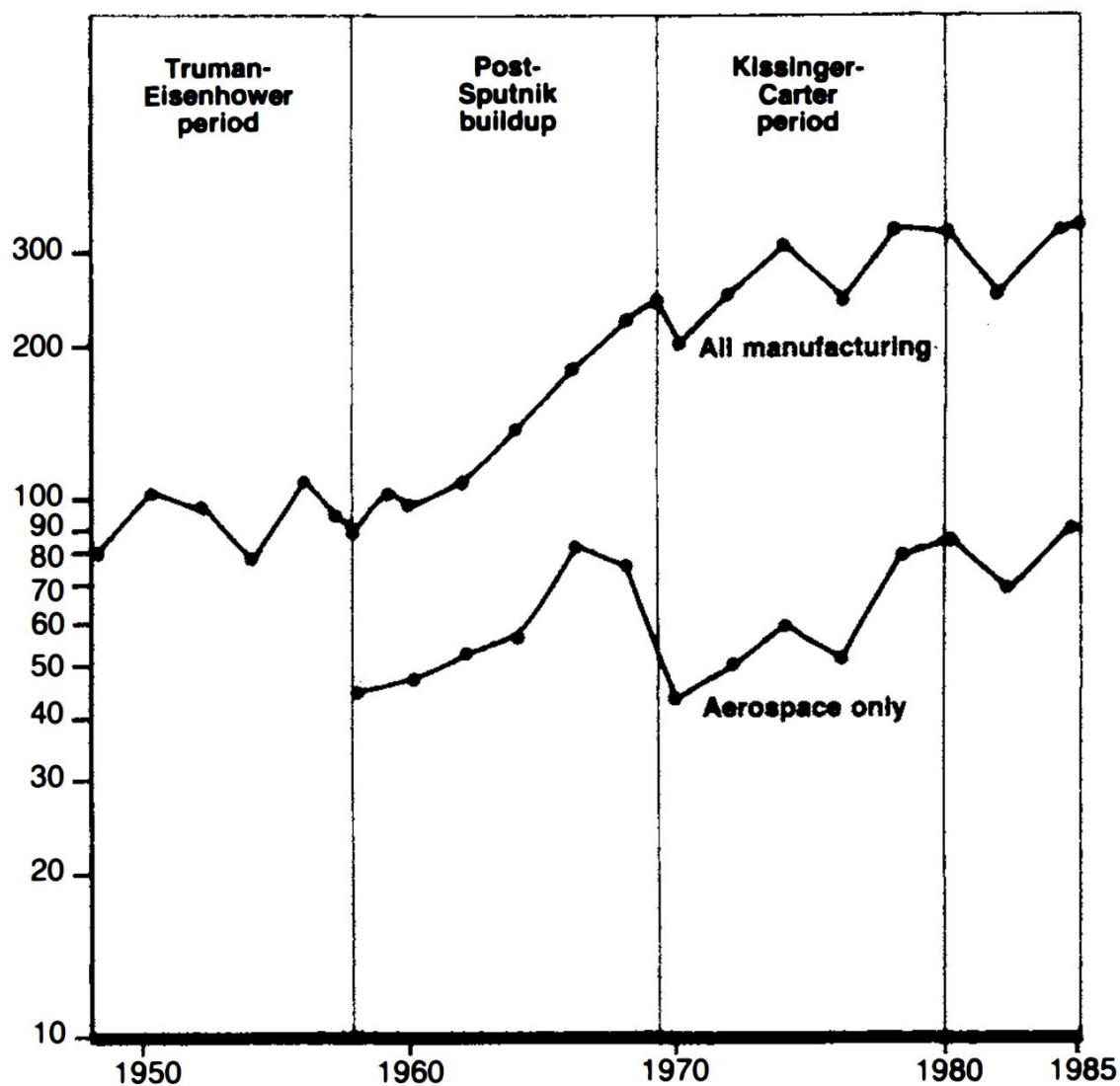


Figure 1 Evolution des nouvelles commandes de biens d'équipement dans le secteur manufacturier en général et celui de l'aérospatial entre les années 1950 et 1985

Executive Intelligence review

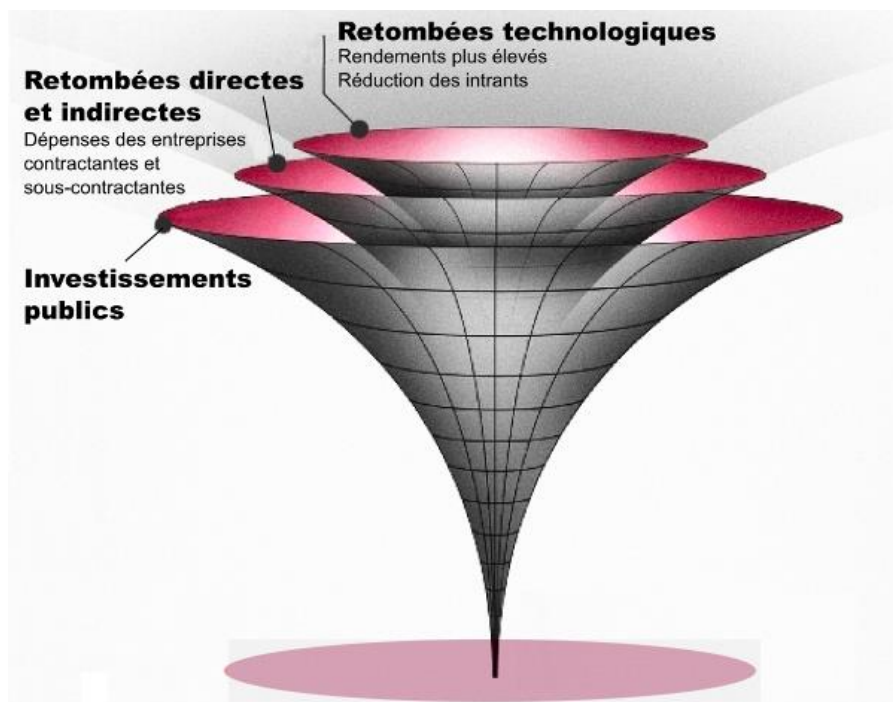


Figure 2 Les trois principaux types de retombées économiques

Solidarité & Progrès

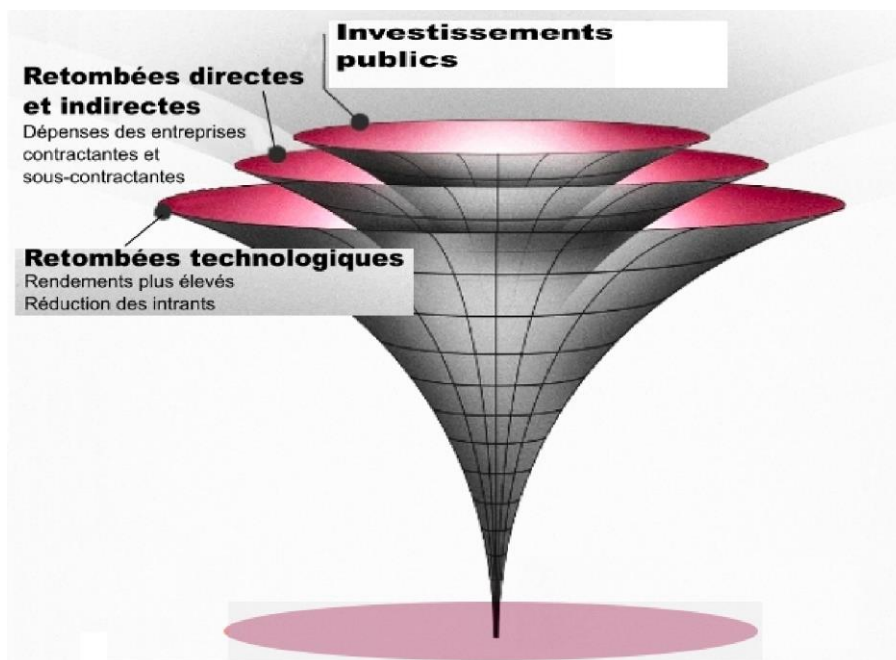


Figure 3 Les trois principaux types de retombées économiques avec le renouvellement des vols habités notamment vers Mars

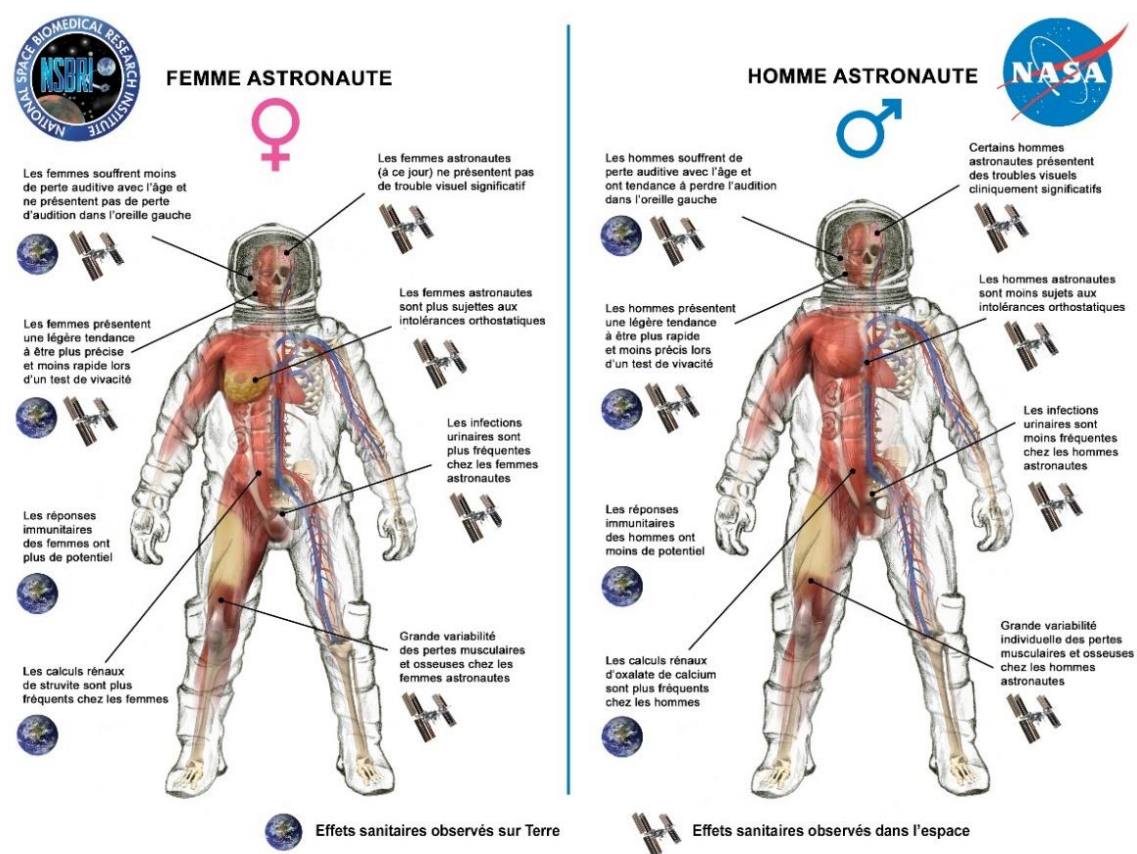


Figure 4 Comparaison sexuelle entre des effets sanitaires observés sur Terre et dans l'Espace

NASA

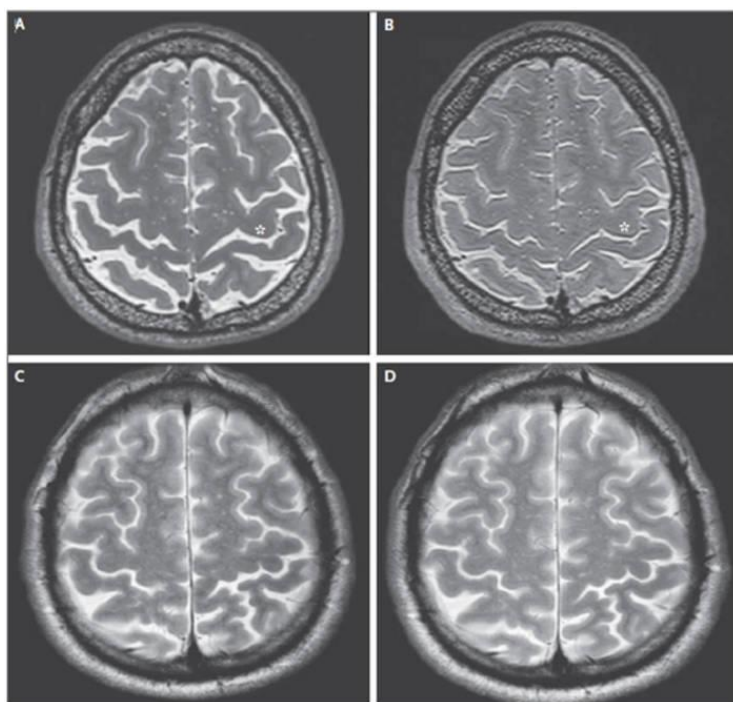


Figure 5 Effets du vol spatial sur la structure cérébrale d'un astronaute.

Images axiales (IRM) du cerveau, avant (A) et après (B), d'un astronaute ayant effectué un vol spatial de longue durée sur la Station spatiale internationale, nous pouvons noter « l'écrasement » du cortex sur (B). Puis celles d'un autre astronaute, avant (C) et après (D), un vol spatial de courte durée sur la navette spatiale. Les clichés ne montrent dans ce cas aucune modification du cerveau.

Massachusetts Medical Society/ Donna R. Roberts

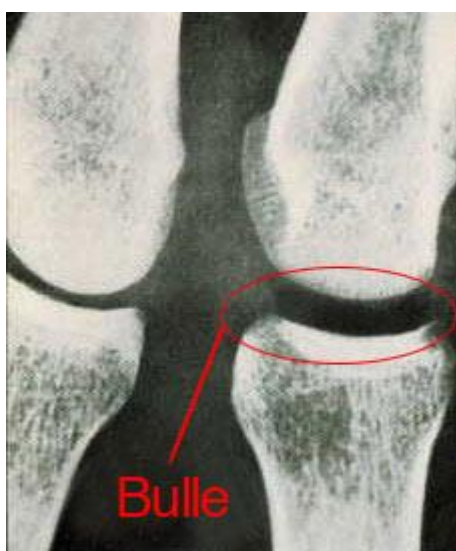


Figure 6 La radiographie montre les effets d'une décompression rapide sur l'organisme. À gauche, un os normal et à droite, un os présentant une bulle.

Agence Spatiale Canadien

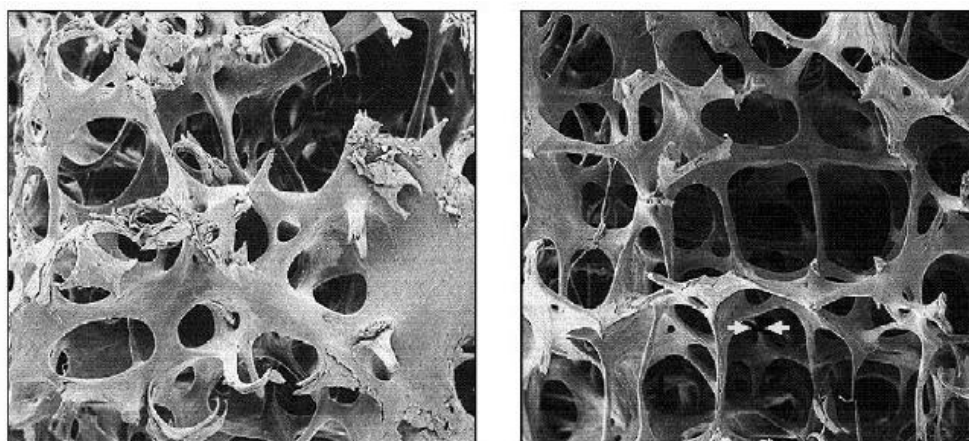


Figure 7 A gauche un os sain et à droite un os ostéoporotique

Urofrance

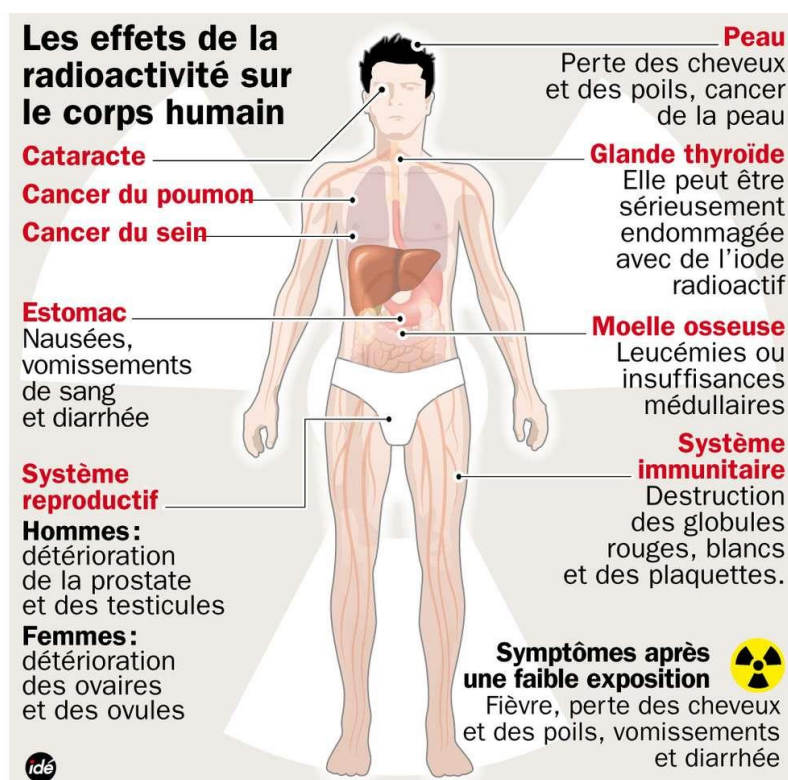


Figure 8 Les effets de la radioactivité sur le corps humain

Commissariat Général à l'Energie Atomique

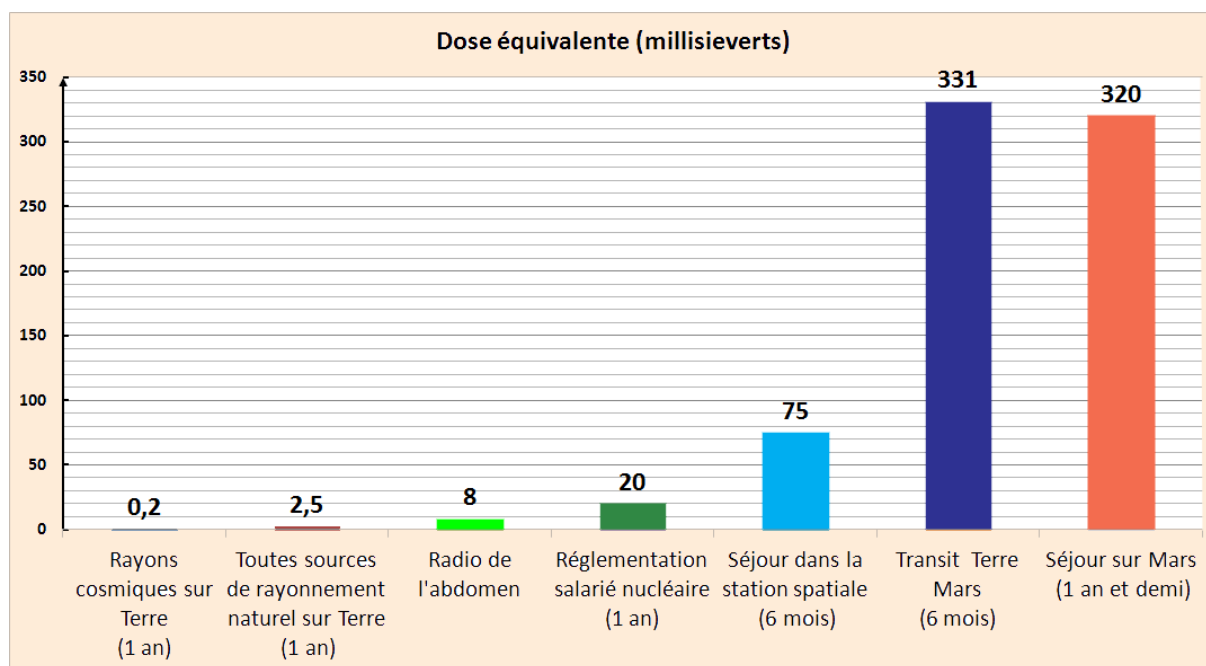


Figure 9 Comparaison des doses reçues durant une mission habitée vers Mars et des doses reçues sur Terre et en orbite basse.

Données de Mars fournies par Mars Science Laboratory/Curiosity).



Figure 10 MELiSSA, un écosystème semblable à celui d'un lac

ESA



Figure 11 Fonctionnement de MELiSSA

Daily Science

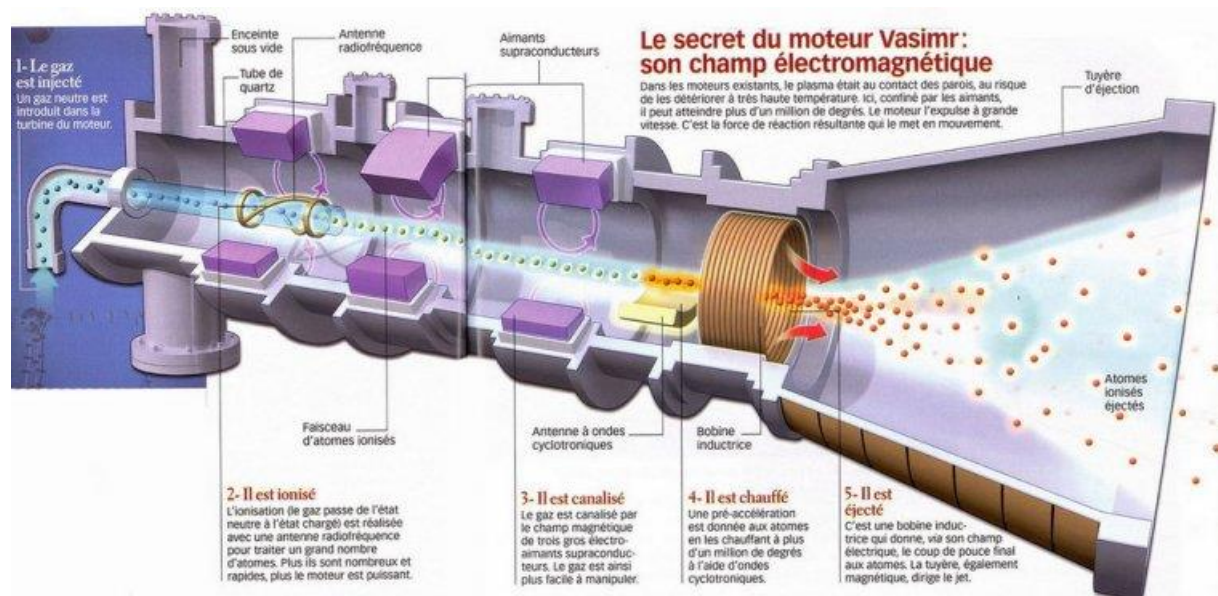


Figure 12 Explication du fonctionnement du moteur VASIMR

Astronomie Skyrock

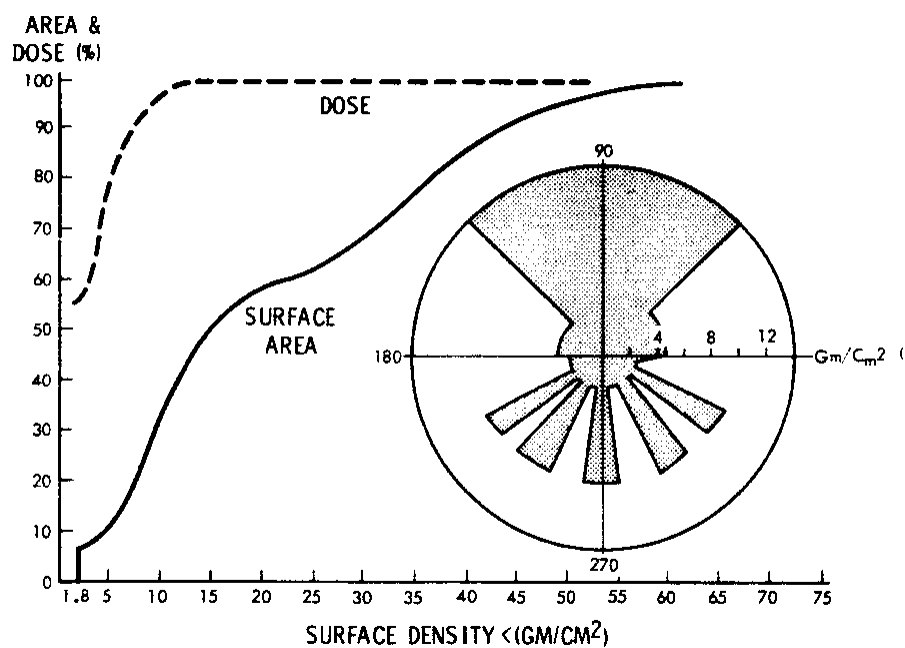


Figure 13 Apollo geometry-does relationship

NASA

- HIGH HYDROGEN CONTENT MATERIALS (H_2O , $C_3H_5NO_2$)
- IDEALIZED
- APPLIED IN THINNEST AREA (30.5 FT^2)

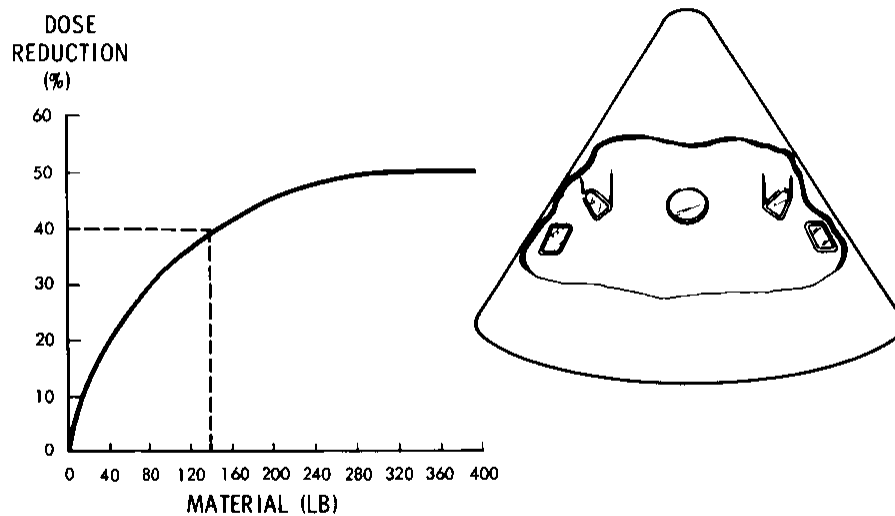


Figure 14 Apollo CM weight - dose reduction relationship

NASA

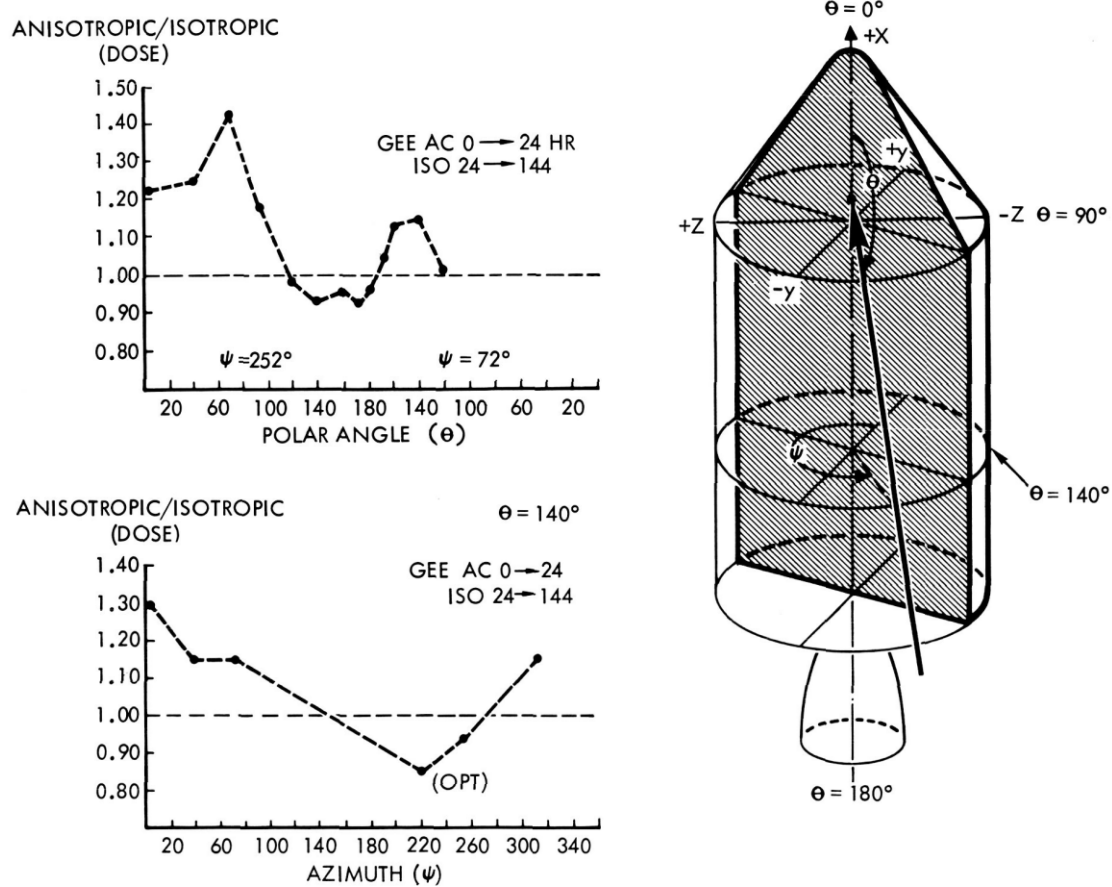


Figure 15 Effect of spacecraft orientation on dose

NASA

TABLE I***Dose Reduction with Spot Shielding in Window Region of CSM***

Shielding methods	Percent of unshielded dose
No spot shielding.....	100
Minimum H ₂ O available.....	82
Maximum H ₂ O available.....	70
Redesigned LiOH canister.....	65
Polyurethane panel.....	60
Maximum shielding in window region..	50

NASA

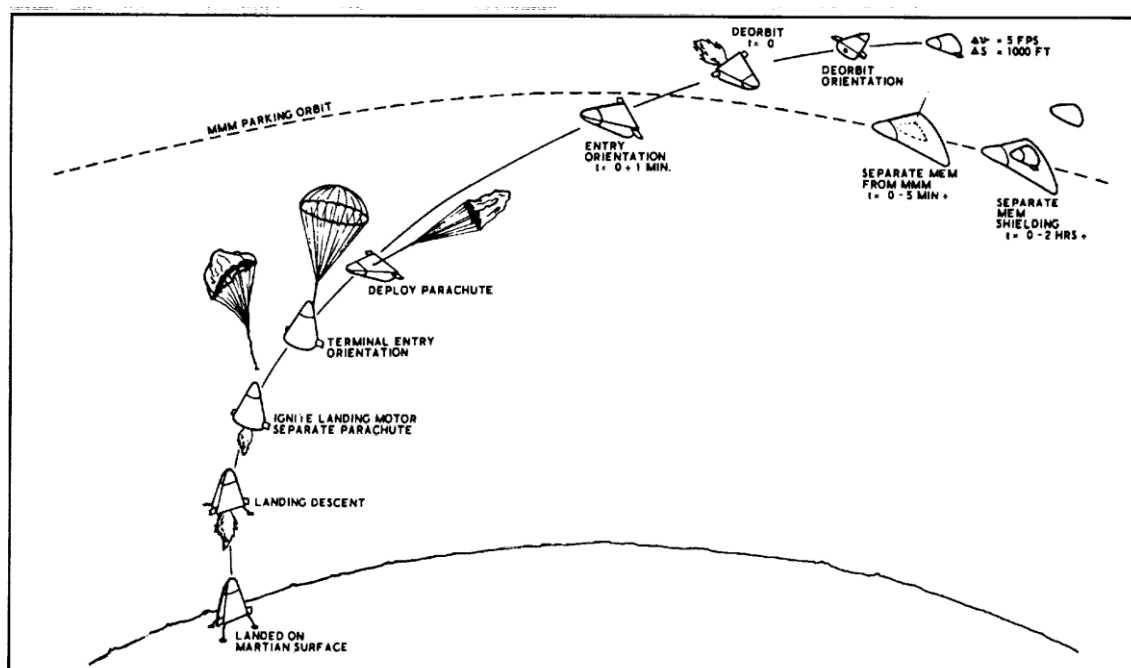


Figure 16—Landing on Mars. Aeronutronic's Mars lander, a lifting body glider, relied on aerodynamic lift to minimize required propellant. The design was based on optimistic estimates of Martian atmospheric density. ("Summary Presentation: Study of a Manned Mars Excursion Module," Franklin Dixon, Proceeding of the Symposium on Manned Planetary Missions: 1963/1964 Status, NASA TM X-53049, Future Projects Office, NASA George C. Marshall Spaceflight Center, Huntsville, Alabama, June 12, 1964, p. 467.)

Evaluation des différents paramètres permettant de créer un bouclier magnétique, protégeant une station spatiale en rotation des particules solaires, dans le cas d'un champ magnétique stationnaire⁶

⁶ Nous n'avons pas trouvé de travaux à ce sujet, c'est pourquoi nous avons décidé de mener nous-même, avec les connaissances dont nous disposons à ce jour, ce travail.

Cette étude ne se veut exhaustive et n'est à considérer que dans le but d'illustrer les difficultés rencontrées dans l'élaboration d'un tel bouclier aux vues des contraintes techniques et humaines quant à la création d'un champ magnétique et ses conséquences sur la proximité avec l'équipage.

Nous supposons dans cette étude que le champ magnétique B est créé par une bobine de N spires parcourue par une intensité I .

Enoncé de l'étude

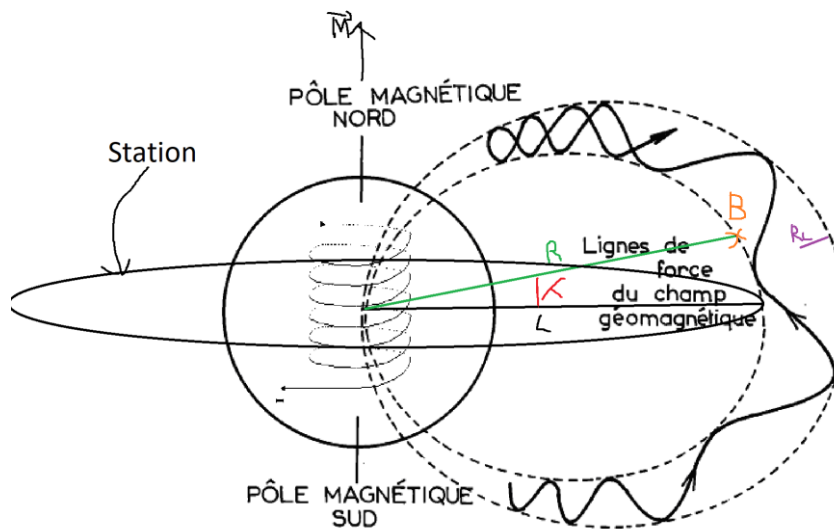


Figure 2 Schéma d'un bouclier magnétique entourant une station rotative à gravité artificielle

Les relations suivantes sont données par les coordonnées géomagnétiques d'un point appartenant aux lignes de champ :

$$B = \frac{M}{R^3} \sqrt{4 - \frac{3R}{L}}$$

$$R = L \times \cos^2(\lambda)$$

Équation 1 coordonnées géomagnétiques

Avec L la longueur entre le point de calcul du champ magnétique et le centre de la bobine et λ la latitude du point de calcul du champ magnétique :

$$M = N \times I \times S$$

M est le moment magnétique de la bobine, N le nombre de spires, I l'intensité et S la surface de la bobine

Le système étudié est $\{particule\ solaire\}$

Les Forces extérieures appliquées sont la force de Lorentz, $\mathcal{F}_{Lorentz}$ et la force gravitationnelle $\mathcal{F}_{gravitationnelle}$ négligeable dans le cas de notre étude.

$$2^{ème} \text{ Loi de Newton : } \vec{\mathcal{F}}_{Lorentz} = m_{particule} \times \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Avec $\|\vec{\mathcal{F}}_{Lorentz}\| = q(\|\vec{v} \wedge \vec{B}\|)$, où q est la charge de la particule

$$\text{Donc, } q \times v \times B = m_{particule} \times \frac{v^2}{r}$$

$$\text{D'où, } r = \frac{m \times (v_{particule} - v_{station})}{|q| \times B}$$

On appelle rayon de Larmor le rayon du mouvement d'une particule le long d'une ligne de champ d'un champ magnétique constant, noté r_L et définit par :

$$r_L = \frac{m \times (v_{particule} - v_{station})}{|q| \times B}$$

Avec m la masse de la particule et q la charge de la particule

Calculs numériques

Les particules solaires étant principalement constituées d'électrons et de protons il convient de faire une étude des électrons dans un premier temps et des protons dans un second temps.

Si on considère une station de rayon $R_{station}$, il faut que r_L soit strictement inférieur à L

$$R_{station} = L = 10 \text{ m}$$

$r_{L_{electron}} = 3.4 \text{ m}$ en considérant que $B_{electron}(\lambda = 0) = 5 \times 10^{-4} \text{ T}$ soit $0,5 \text{ mT}$, (sachant que le champ magnétique présenterait des risques de troubles visuels ou de maux de tête aigus à partir de 2 mT et des conséquences graves sur la santé à partir de 2 T selon l'IRNS)

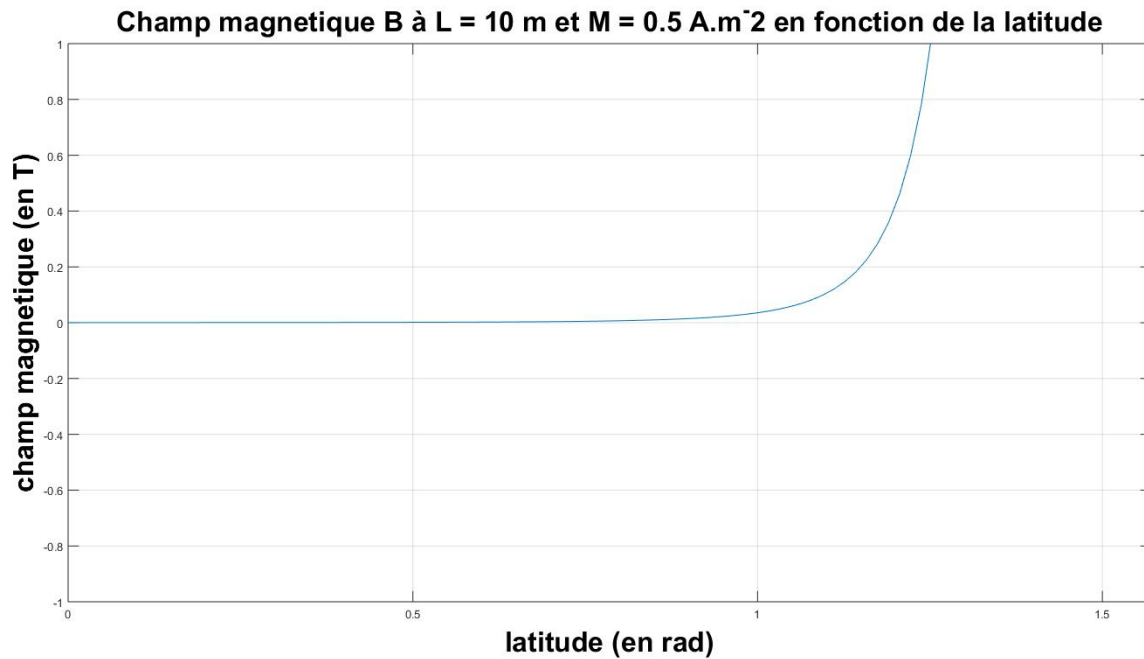
$$\text{D'où } M_{electron} = 0.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$I = \frac{M}{S}$ en supposant que $S = 10 \text{ m}^2$, alors $I = 50 \text{ mA}$ (ordre de grandeur d'une prothèse intra-auriculaire)

Maintenant, si nous faisons varier λ on obtient avec Matlab :

0,000500000000 0000000	0,00050056668 6991701	0,00050056668 6991701	0,00050511821 5415803	0,00050912725 1971626
0,00051431831 4704204	0,00052071938 7834177	0,00052836528 6981797	0,00053729803 8845621	0,00054756734 1376052

Quelques valeurs du champ en fonction de λ



Graphique 1 Champ magnétique nécessaire pour contenir des électrons

On remarque que lorsque $\lambda \rightarrow \frac{\pi}{2}$, B croît quasi-exponentiellement, ce qui signifie qu'aux pôles magnétiques le champ magnétique sera très élevé.

$r_{Lproton} = 6.3 \text{ m}$ en considérant que $B_{proton}(\lambda = 0) = 5 \times 10^{-1} \text{ T}$ soit 0.5 T donc 1000 fois plus que $B_{electron}$

D'où $M_{proton} = 4000 \text{ A.m}^2$

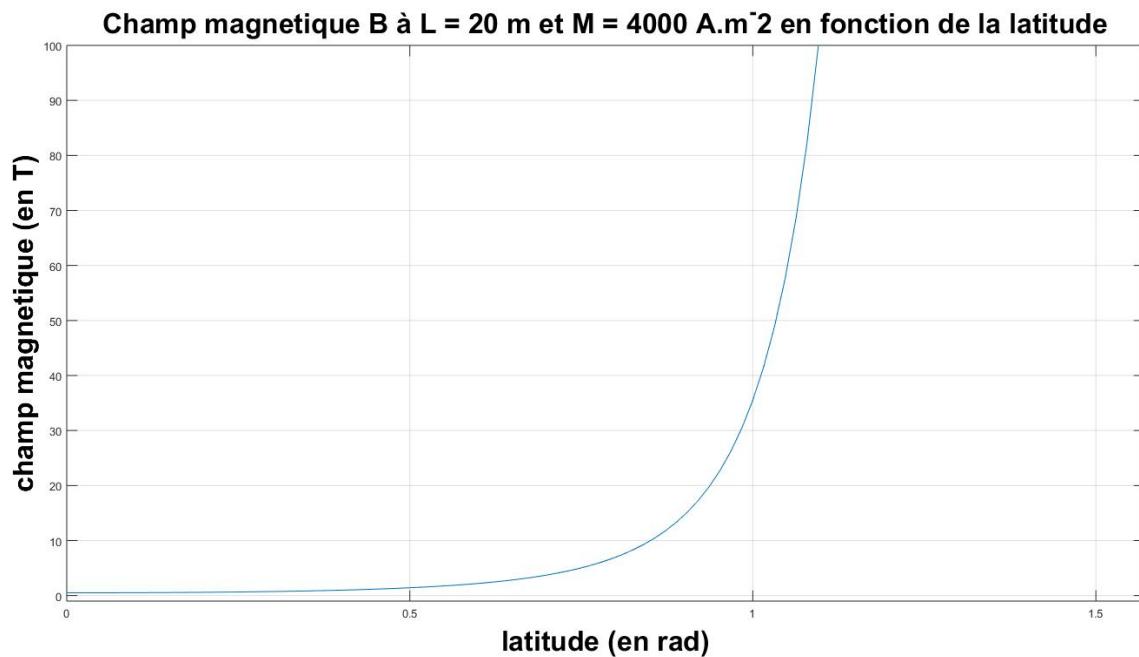
De plus, dans ce cas $L > R_{station}$, par exemple $L = 20 \text{ m}$ et nécessairement $L > r_{Lproton}$

$I = \frac{M}{S}$ en supposant que $S = 10 \text{ m}^2$, $I = 400 \text{ A}$ (ordre de grandeur d'une batterie à plomb automobile)

Matlab nous donne pour les variations de la latitude λ :

0,00050000000 0000000	0,00050056668 6991701	0,00050226974 7974531	0,00050511821 5415803	0,00050912725 1971626
0,00051431831 4704204	0,00052071938 7834177	0,00052836528 6981797	0,00053729803 8845621	0,00054756734 1376052

Quelques valeurs du champ en fonction de λ



Graphique 2 Champ magnétique nécessaire pour contenir des protons

On remarque que lorsque $\lambda \rightarrow \frac{\pi}{2}$, B croît quasi-exponentiellement, beaucoup plus vite que pour les électrons, ce qui signifie qu'aux pôles magnétiques le champ magnétique sera très élevé.

Analyse physique et critique des résultats

Avec la considération de nos hypothèses nous nous plaçons dans un cas idéal ne décrivant évidemment pas la réalité. C'est pourquoi les résultats obtenus n'ont en aucun cas la prétention d'être valides. Avec les valeurs que nous avons arbitrairement choisies nous obtenons des résultats numériques sur le champ magnétique et l'intensité qui ne sont toutefois pas absurdes.

Pour ce qui est de l'intensité les ordres de grandeur correspondent à ce que nous pouvons rencontrer sur Terre. En ce qui concerne le champ magnétique, sachant que le champ magnétique à la surface terrestre est environ de 50 microteslas, et que nous obtenons un champ de 0,5 milliteslas pour les électrons et 0.5 teslas pour les protons, soit respectivement 10 fois et 10 000 fois plus que le champ auquel nous sommes habitués, il est nécessaire d'étudier davantage les effets du champ magnétique sur le corps humain pour diverses valeurs du champ magnétique.

De plus, en admettant que nous maîtrisons la conception et la construction d'une telle station orbitale, la volonté de recréer « l'environnement magnétique terrestre » avec ce type de concept présente certains inconvénients intrinsèques à l'idée elle-même (i.e. ne dépendant pas des valeurs choisies pour R, L, B, ...):

- ❖ L'intensité du champ magnétique que nous serions physiquement capables de produire est-elle réellement suffisante pour stopper des particules à très hautes énergies ?
- ❖ Le fait de créer un champ magnétique semblable à celui de la Terre nécessite la présence de blindages aux pôles magnétiques où la norme du champ magnétique est la plus élevée.
- ❖ L'existence d'un champ magnétique autour de la station pourrait interférer ou du moins ajouter des contraintes sur les télécommunications et les données de télémétrie de la station, déjà problématiques.
- ❖ Aussi, il est nécessaire d'élaborer une station spatiale à partir de matériau non-conducteur ne comportant aucunes boucles de courants faisant le tour de la station. En effet, d'après les lois de l'induction, si un courant est « en mouvement » dans un champ magnétique alors apparaît un courant induit et une force de Laplace qui d'après la loi de Lenz va s'opposer à la rotation de la station. Il serait donc essentiel de segmenter le réseau électrique.

Au final, nous pensons que cette idée n'est pas à rejeter, avec un niveau de connaissances supérieures nous pourrions préciser notre étude. En effet, il conviendrait dans un premier temps d'élargir notre gamme de valeur puis de s'affranchir de certaines approximations. Mais nous pensons qu'aux vues de notre évaluation l'idée n'est pas incongrue et apporterait une solution à un problème majeur pour ce « voyage » qui n'est autre que l'exposition aux radiations et aux rayonnements.