

RAPPORT FINAL

Document n° 118/FRS/SPACE'IBLES
du 22 juin 2021

SPACE'IBLES SVE **– Soutien à la Vie dans l'Espace –** **Rapport final**

PAUL WOHRER

FONDATION
pour la **RECHERCHE**
STRATÉGIQUE

Liste des acronymes utilisés

ADN	Acide désoxyribonucléique
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
BLSS	<i>Bioregenerative Life Support System</i>
CEA	<i>Controlled Environment Agriculture</i>
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CyBLISS	<i>Cyano-Bacterial Bioregenerative Support Systems</i>
DGA	Direction Générale de l'Armement
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
EVA	<i>Extravehicular Activity</i>
FRS	Fondation pour la Recherche Stratégique
HI-SEAS	<i>Hawaii Space Exploration Analog and Simulation</i>
INSERM	Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale
IRBA	Institut de Recherche Biomédicale des Armées
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISS	<i>International Space Station</i>
LGH	<i>Lunar Green House</i>
MELISSA	<i>Micro-Ecological Life Support System Alternative</i>
NAS	<i>National Academy of Science</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIAC	<i>Nasa Institute for Advanced Concept</i>
OGM	Organisme Génétiquement Modifié
OPEX	Opération Extérieure
R&D	Recherche et Développement
SBIR	<i>Small Business Innovation Research</i>
SVE	Soutien à la Vie dans l'Espace

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES UTILISÉS

PRÉAMBULE.....	7
MÉTHODOLOGIE.....	8
INTRODUCTION.....	8
LISTE DES MEMBRES DU GROUPE SVE.....	9
LE SYSTÈME DE SUPPORT-VIE DANS L'ESPACE.....	11
1. L'EAU DANS L'ESPACE.....	14
1.1. Disponibilité de l'eau dans l'espace.....	14
1.2. Les besoins en eau dans l'espace.....	15
2. L'ALIMENTATION DANS L'ESPACE.....	17
2.1. Life Baseline Support Values.....	17
2.2. Agriculture spatiale.....	17
2.2.1. Méthodes existantes.....	17
2.2.2. Méthodes potentielles d'agriculture spatiale.....	20
A. Agriculture classique.....	20
B. Alimentation de synthèse.....	21
3. RECOMMANDATIONS POUR LES SYSTÈMES DE SUPPORT-VIE.....	24
MÉDECINE SPATIALE.....	25
1. CONTRAINTES MÉDICALES DE LA VIE SUR MARS.....	25
2. ACTIONS MÉDICALES PRÉVENTIVES ET CURATIVES À DISTANCE.....	25
2.1. Médecine préventive : maintien de la condition physique.....	26
2.1.1. Contres mesures physiques.....	26
2.1.2. Un monitoring médical continu.....	26
2.1.3. Sélection physiologique des candidats.....	27
2.2. Médecine curative.....	27
2.2.1. Besoin en compétences médicales.....	27

2.2.2. Le matériel médical.....	28
2.2.3. Les compétences médicales.....	29
3. GESTION DE CRISE MÉDICALE DANS L'ESPACE	30
3.1. Crise sanitaire due à un agent pathogène	31
3.2. Procédure en cas de mort d'un membre d'équipage.....	31
4. PISTES D'ÉVOLUTIONS DES TRAVAUX.....	32
5. RECOMMANDATIONS POUR LA MÉDECINE SPATIALE.....	32
RADIATIONS	33
1. CARACTÉRISTIQUES DES RADIATIONS SPATIALES.....	33
2. EFFETS DES RADIATIONS SUR LES HUMAINS	35
3. EFFETS DES RADIATIONS SUR LES PLANTES ET L'ÉLECTRONIQUE	36
4. ARCHITECTURE ANTIRADIATION	37
5. QUESTIONS POSÉES POUR DES SÉJOURS PROLONGÉS SUR MARS	39
6. RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION DES RADIATIONS.....	40
PSYCHOLOGIE SPATIALE	43
1. SÉLECTION DES ASTRONAUTES.....	43
2. ÉPREUVES PSYCHOLOGIQUES DANS L'ESPACE.....	45
2.1. Le confinement et l'isolement	45
2.2. L'absence de communication.....	47
3. LES ENVIRONNEMENTS ANALOGUES OU COMPARABLES À LA VIE DANS L'ESPACE	48
3.1. Les bases en antarctique	48
3.2. Les sous-marins nucléaires.....	49
3.3. Les villages militaires d'opérations extérieures.....	50
4. RECOMMANDATIONS POUR LA PSYCHOLOGIE DANS L'ESPACE	51
RECOMMANDATIONS	53
1. SYSTÈMES DE SUPPORT-VIE.....	53
2. MÉDECINE SPATIALE	54
3. RADIATIONS	54
4. PSYCHOLOGIE SPATIALE.....	55
CONCLUSION.....	57

TABLE DES FIGURES

FIGURE N° 1 :	L'ÉCOSYSTÈME FERMÉ DE BIOSPHÈRE 2.....	11
FIGURE N° 2 :	SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT DE MELISSA.....	12
FIGURE N° 3 :	SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT DE CYBLISS	13
FIGURE N° 4 :	DE LA GLACE D'EAU SE SUBLIME SUR MARS APRÈS LE CREUSEMENT D'UNE TRANCHÉE PAR LE ROBOT <i>MARS PHOENIX</i>	14
FIGURE N° 5 :	PÔLE SUD DE LA LUNE OÙ LA PRÉSENCE D'EAU EST ENVISAGÉE	15
FIGURE N° 6 :	TAUX TYPIQUES D'UTILISATION DE L'EAU EN RÉGIME PERMANENT POUR DIVERSES MISSIONS EN KILOGRAMME/MEMBRE D'ÉQUIPAGE/JOUR.....	16
FIGURE N° 7 :	UN MENU DE 10 JOURS POUR LES MISSIONS DE COURTE DURÉE.....	17
FIGURE N° 8 :	CHAMBRE DE LA LUNAR GREEN HOUSE	18
FIGURE N° 9 :	ASTRONAUTE PEGGY WHITSON (NASA) DURANT LA RÉCOLTE ET LE NETTOYAGE DU VEG-03 DANS LE NŒUD 2 DE L'ISS	18
FIGURE N° 10 :	PREMIÈRES GRAINES DE COTON AYANT GERMÉ SUR LA LUNE DURANT LA MISSION CHANG'E-4 ..	19
TABLEAU N° 1 :	RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTS TYPES DE CULTURE	20
FIGURE N° 11 :	SCHÉMA DE PRODUCTION DE VIANDE IN VITRO À PARTIR DE CELLULES SOUCHES ANIMALES	22
FIGURE N° 12 :	UNE PIZZA FABRIQUÉE PAR IMPRESSION 3D À PARTIR D'ALIMENTS GÉNÉRIQUES QUI POURRAIENT ÊTRE TRANSFORMÉS SELON LE SOUHAIT DES ASTRONAUTES	23
FIGURE N° 13 :	CONTRÔLE OCULAIRE PRÉVENTIF D'UN DES MEMBRES DE L'ÉQUIPAGE DE MARS500	26
FIGURE N° 14 :	RENFORCEMENT MUSCULAIRE À BORD DE LA MISSION EXPÉRIMENTALE MARS500.....	27
FIGURE N° 15 :	SYSTÈME ECHO : ÉCHOGRAPHIE MANOEUVRABLE À DISTANCE, ACTUELLEMENT TESTÉE À BORD DE L'ISS.....	28
FIGURE N° 16 :	MODULE MÉDICAL DE MARS500.....	29
FIGURE N° 17 :	SIMULATION D'INTERVENTION DENTAIRE À BORD DE LA STATION SKYLAB	30
FIGURE N° 18 :	L'ATMOSPHÈRE MARTIENNE EST TROP TÊNUE POUR PROTÉGER EFFICACEMENT DES RADIATIONS SOLAIRES	33
FIGURE N° 19 :	ESTIMATION DE LA DOSE REÇUE POUR DIFFÉRENTES SITUATIONS D'EXPOSITION SUR TERRE ET SUR MARS	34
FIGURE N° 20 :	ESTIMATION DES DOSES DUES AU RAYONNEMENT COSMIQUE ATTEIGNANT LA SURFACE DE MARS	35
FIGURE N° 21 :	ILLUSTRATION DE LA RELATION ENTRE L'EXPOSITION AUX SUBSTANCES CONTAMINANTES ET LA QUALITÉ DE L'ÉCOSYSTÈME	37
FIGURE N° 22 :	CONCEPT D'HABITAT MARTIEN PROPOSÉ PAR R. HEIDMANN	38
FIGURE N° 23 :	LE PROJET OLYMPIA DE SYLVE TRUYMAN	38
FIGURE N° 24 :	PROJET DE PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS PAR SYSTÈME ÉLECTROSTATIQUE	39

FIGURE N° 25 :	ASTRONAUTE DE L'ÉQUIPAGE DE MARS500 EN PHASE DE SOMMEIL PROFOND.....	44
FIGURE N° 26 :	ÉQUIPAGE INTERNATIONAL DE LA MISSION EXPÉRIMENTALE DE MARS500.....	45
FIGURE N° 27 :	L'ASPECT VISUEL DE L'AMÉNAGEMENT D'UN HABITAT SPATIAL SEMBLE IMPORTANT POUR LES ASTRONAUTES.....	46
FIGURE N° 28 :	L'ÉQUIPAGE DE MARS500 CÉLÉBRANT LA FÊTE D'HALLOWEEN	47
FIGURE N° 29 :	NOMBRE DE MESSAGES ENVOYÉS PAR SIX MEMBRES D'ÉQUIPAGE DE MARS500 AVANT ET APRÈS LA PÉRIODE DE PERTE DE COMMUNICATION.....	48
FIGURE N° 30 :	LA BASE <i>CONCORDIA</i> EN ANTARCTIQUE	48
FIGURE N° 31 :	SCHÉMA D'UN SOUS-MARIN NUCLÉAIRE LANCEUR D'ENGIN FRANÇAIS.....	49
FIGURE N° 32 :	MÉDITATION EN PLEINE CONSCIENCE DES ASTRONAUTES LORS D'UNE MISSION ANALOGUE DE SIMULATION MARTIENNE.....	50
FIGURE N° 33 :	UN VILLAGE D'OPÉRATIONS EXTÉRIEURES EN AFGHANISTAN.....	51

SPACE'IBLES SVE

– Soutien à la Vie dans l'Espace –

Rapport final

Préambule

Le groupe prospectif du CNES « Space'ibles » a été créé en 2018. Space'ibles s'inscrit dans la vision à long terme des agences spatiales : permettre une vie durable et pérenne sur d'autres corps célestes au sein de communautés autonomes. Le premier acte de la prospective s'est achevé en 2019 au Salon du Bourget.

Les *Space'ibles days* les 7 et 8 novembre 2019 ont lancé l'Acte 2 de Space'ibles, démarrant une nouvelle saison de réflexion prospective à travers 6 groupes de travail, dont le groupe « Soutien à la Vie dans l'Espace ».

Space'ibles est composé de plusieurs groupes de travail explorant différentes facettes de l'exploration spatiale future : le trajet, le séjour, ou encore l'éthique et les règles juridiques qui prévaudront. Le groupe « Soutien à la Vie dans l'Espace » (SVE) fait suite aux réflexions menées par le groupe « Vivre au Quotidien dans l'Espace » lors du premier acte de Space'ibles.

Le groupe « Soutien à la Vie dans l'Espace » a pour but d'étudier les modalités concrètes de la vie sur d'autres planètes. Quelle préparation physiologique et quels besoins technologiques seront nécessaires à la survie des habitants et pourront rendre cette vie non seulement supportable mais enrichissante et désirable ?

L'objectif de ce groupe consiste à réfléchir à des scénarios à moyen et long termes pour envisager des recommandations concrètes à mettre en place à court-moyen terme, telles que des expériences scientifiques, des programmes, etc.

Le groupe SVE est constitué de bénévoles. Certains travaillent au sein de la communauté spatiale, d'autres non mais leur expertise respective a permis d'éclairer de nombreux sujets importants au cours de l'Acte 2 de Space'ibles.

Les animateurs du groupe sont Guillemette Gauquelin Koch (guillemette.gauquelinkoch@cnes.fr) du CNES et Paul Wohrer (p.wohrer@frstrategie.org) de la Fondation pour la Recherche Stratégique.

Méthodologie

Le groupe SVE a développé sa vision au cours de trois réunions plénières et trois réunions thématiques pendant l'année 2020. Le résultat de ces travaux est le présent rapport, écrit de façon participative par les membres du groupe. L'objectif consiste à réfléchir à un ou plusieurs sujets à moyen-long terme dans le spatial. Cinq autres groupes travaillent à d'autres sujets, leur description est disponible sur le site <http://www.spaceibles.fr/>.

La première réunion plénière a servi d'introduction aux différents sujets qui constituent le cœur de la démarche de SVE : Médecine Spatiale, Systèmes de support-vie, Méthodes d'agriculture, Équilibre psychologique.

La seconde réunion plénière a permis d'aborder les sujets de la production de nourriture, de la protection contre les radiations et de la psychologie dans l'espace. Ces trois sujets ont été approfondis au cours de trois réunions en petits groupes.

La troisième réunion plénière a permis d'aborder le sujet des crises potentielles lors d'un voyage spatial et d'étudier les scénarios de prévision et de gestion de ces crises.

Introduction

On constate récemment une ambition renouvelée dans les programmes de vols spatiaux habités : ainsi des programmes lunaires et martiens, publics et privés, sont actuellement en cours de développement. Dans ce contexte, un exercice de prospective sur la vie dans des bases spatiales pérennes à moyen ou long terme se révèle pertinent, car il permet de mesurer l'écart entre le stade actuel des technologies et les besoins qu'auront les habitants de ces bases pour vivre en autonomie sur de longues périodes.

La vie dans l'espace présente en effet de nombreux défis, bien sûr liés aux dangers de l'environnement spatial, mais également à la communauté humaine elle-même dont les réactions naturelles et la fragilité intrinsèque pourraient poser de graves problèmes dans la perspective d'une installation durable. Il est apparu cependant que malgré les épreuves, vivre dans l'espace pourrait s'avérer une expérience unique, enrichissante et, pourquoi pas, heureuse. Le groupe « Soutien à la Vie dans l'Espace » (SVE) s'est ainsi concentré sur la vie dans l'espace à long terme, et la possibilité d'une telle existence en fonction des besoins physiologiques et psychologiques de ses habitants.

Ce rapport se présente en quatre parties, qui indiquent les principaux points de débats évoqués par le groupe au cours de nos réunions. Ces quatre sujets représentent les principaux défis auxquels seront confrontées des communautés humaines sur d'autres corps célestes :

1. Système de support-vie spatial ;
2. Médecine spatiale ;
3. Radiations spatiales ;
4. Psychologie spatiale.

L'étude de ces sujets et la résolution des problèmes posés pourraient permettre à terme un soutien durable et pérenne à la vie dans l'espace.

Liste des membres du groupe SVE

	Prénom	Nom	Organisation
1	Diane	Beaulieu	Médecin Aéronautique et Spatial
2	Patrice	Benarroche	CNES
3	Marc	Benderitter	IRSN
4	Stéphane	Blanc	CNRS
5	Jean-François	Bottolier Depois	IRSN
6	Lucie	Campagnolo	CNES
7	Eugénie	Carnero Diaz	Sorbonne Université- CNRS
8	Valérie	Chartrain	Ouverture de Space'ibles à l'Europe
9	Enora	Clero	IRSN
10	Philippe	Coué	Dassault Aviation
11	Patrick	Delcourt	le Comptoir Prospectiviste
12	Anne	Drapeau	ArianeGroup
13	Emmanuel	Dufresnes	Professeur ENSA, Co-directeur du RST ARCHES
14	Florence	Duveiller	DGA
15	Jean-Jacques	Favier	Ecole des Mines, JJF Consulting
16	Nicolas	Foray	INSERM
17	Guillemette	Gauquelin-Koch	CNES
18	Claude	Gharib	Chercheur émérite CNRS
19	Vincent	Huet	Altran
20	Elisande	Nexon	Fondation pour la Recherche Stratégique
21	Pascal	Niggel	Psychologue Clinicien
22	Charlotte	Poupon	CNES
23	Rémi	Richard	Agrial
24	Arnaud	Saint-Martin	CNRS
25	François	Spiero	CNES
26	Marion	Trousselard	IRBA
27	Sylve	Truyma	Architecte
28	Olivier	Walter	Architecte
29	Peter	Weiss	Comex
30	Paul	Wohrer	Fondation pour la Recherche Stratégique

Le système de support-vie dans l'espace

Un système de support-vie doit permettre aux astronautes de boire, de manger et de respirer. Les contraintes de vivre dans l'espace imposent de limiter au maximum les intrants tout en respectant les besoins. Les systèmes de production seront nécessairement limités en raison des contraintes de la logistique spatiale.

Boire, manger, respirer, se protéger et dormir sont évidemment des besoins essentiels et vitaux. Ces besoins vitaux doivent être respectés pour simplement permettre la survie des astronautes et espérer réussir à atteindre un objectif aussi ambitieux.

Les missions spatiales actuelles fonctionnent en boucle ouverte : le recyclage n'est pas mis en place à 100% et une quantité régulière de ravitaillement est nécessaire. Pour obtenir une autonomie plus importante, il faudra trouver des solutions permettant de limiter la quantité d'intrants, voire concevoir des systèmes de support-vie dits en « boucle fermée » qui ne nécessitent aucun intrant.

Figure n° 1 : L'ÉCOSYSTÈME FERMÉ DE BIOSPHÈRE 2



Plusieurs expériences dans ce sens ont déjà été menées sur Terre. La plus connue est « Biosphère 2 », menée de 1991 à 1992, et s'acheva par un échec. Contrôler intégralement l'équilibre fragile d'un système en boucle fermée s'est avéré être une tâche complexe.

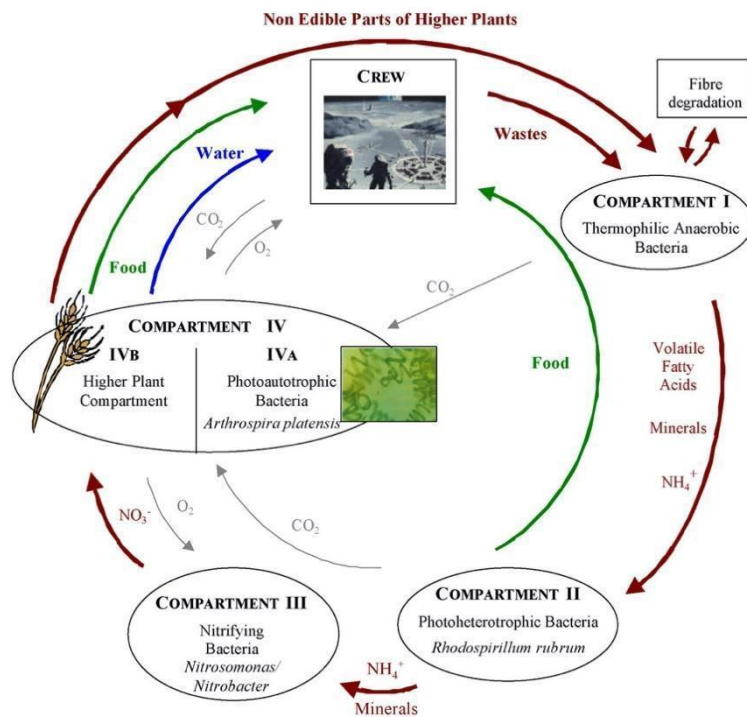
Ces systèmes en boucle-fermée intéressent cependant beaucoup la recherche spatiale, car ils constitueraient une véritable révolution pour les systèmes de support-vie. Les systèmes actuels, présents sur l'ISS ou les stations chinoises, malgré leur efficacité optimale ne seront en effet sûrement pas suffisants pour les expéditions martiennes ou lunaires de long terme.

Plusieurs prototypes de systèmes de support-vie en boucle fermée sont actuellement à l'étude :

► MELISSA

Melissa est un projet de l'ESA qui repose sur une génération d'air ou de nourriture à base de plantes ou d'algues. Elle exploite un « *micro-ecological support system* » ou « MELISSA ». C'est un écosystème totalement clos composé de bactéries anaérobies, extrémophiles, etc. Melissa¹ cherche à mettre en place une infrastructure fermée, et certaines boucles permettent un recyclage proche de 100%. Ce système pourrait théoriquement fonctionner aussi bien sur la Lune que sur Mars. Le projet Melissa semble cependant avancer assez lentement aujourd'hui et il n'existe pas de perspective opérationnelle à court terme.

Figure n° 2 : SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT DE MELISSA

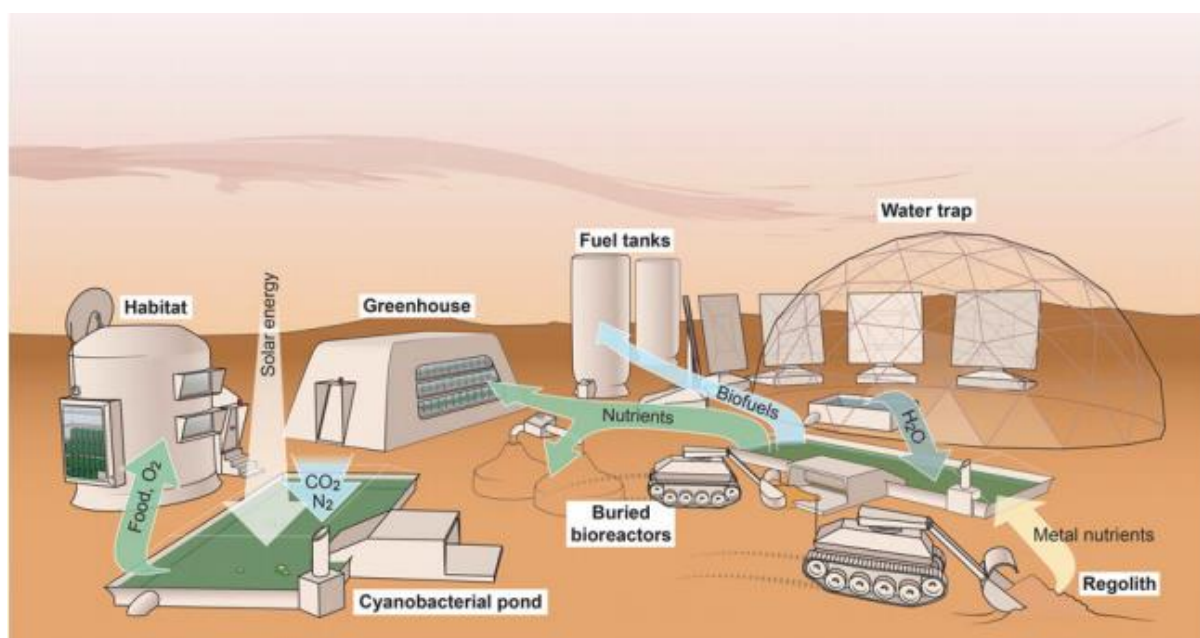


¹ http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa, consulté le 2 juin 2021

► CyBLISS

Le programme **CyBLISS** (*Cyano-Bacterial Bioregenerative Support Systems*) actuellement piloté par la NASA, le DLR et l'ASI, est plus spécifiquement dédié à Mars. Ce projet met en lumière les cyanobactéries, qui constituent le lien entre *Bioregenerative Life-Support System* (BLSS) et les ressources martiennes, permettant ainsi un développement durable et extensible des bases humaines sur Mars. Les ressources nécessaires à la culture de cyanobactéries spécifiques sont disponibles sur Mars grâce à leurs capacités photosynthétiques, à leurs activités de fixation de l'azote et à leur mode de vie lithotrophique. Ainsi, le projet CyBLISS envisage d'utiliser les cyanobactéries pour diverses applications, notamment la production de nourriture, de carburant et d'oxygène, mais aussi pour un usage indirect : les produits issus de leur culture pourraient soutenir la croissance d'autres organismes, ouvrant ainsi la voie à un large éventail d'activités de maintien de la vie des processus biologiques basés sur les ressources martiennes.²

Figure n° 3 : SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT DE CYBLISS



Le contrôle des écosystèmes pose cependant de nombreux défis. Melissa a ainsi mis en lumière que l'élimination ciblée d'une bactérie dans une station peut engendrer d'autres problèmes plus graves de déstabilisation de l'écosystème tout entier : un écosystème en circuit fermé est en effet un équilibre fragile qui peut être rompu très facilement. Un contrôle trop poussé de l'environnement peut aussi avoir des répercussions négatives sur la santé humaine : par exemple, les allergies aux acariens sont en partie causées par le fait de vivre dans un environnement trop propre, l'organisme humain n'étant plus aussi apte à se défendre. Il faudra également considérer la masse à l'export depuis la Terre et les capacités de la logistique spatiale pour juger de l'intérêt présenté par une boucle purement fermée par rapport à un support-vie à boucle ouverte.

² Verseux, Cyprien, et al., « Sustainable life support on Mars—the potential roles of cyanobacteria », *International Journal of Astrobiology*, 15.1 (2016): 65-92.

Dans ce contexte, il ne faudra pas considérer que la survie des humains, mais également celle des animaux, plantes et micro-organismes qui les accompagneront. Le rôle des insectes apparaît ainsi important dans ce type d'écosystème : ils ont un rôle à jouer pour la pollinisation des plantes, l'oxygénation du sol, etc. Il serait envisageable potentiellement de se servir des nutriments qu'ils contiennent comme source de nourriture et des déchets qu'ils produisent comme apport nutritif pour la croissance de végétaux.

Les connaissances dans le domaine du « support-vie » sont éparpillées entre plusieurs disciplines très différentes. Les recherches et études d'agriculture spatiale ne prennent pas forcément en compte le problème des radiations, par exemple. Space'ibles pourrait aider à bâtir une perspective interdisciplinaire sur ces questions et construire des ponts entre différentes communautés qui ne se parlent pas aujourd'hui.

1. L'eau dans l'espace

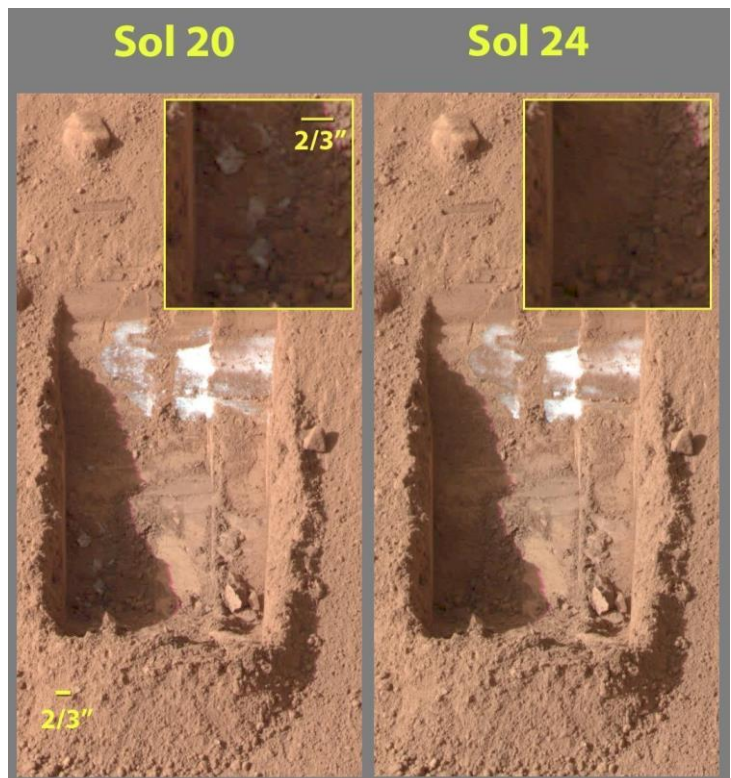
1.1. Disponibilité de l'eau dans l'espace

L'eau dans une colonie extraterrestre sera vitale pour les fonctions suivantes :

- Support-vie des habitats ;
- Agriculture ;
- Protection contre les radiations ;
- Carburant des vaisseaux spatiaux.

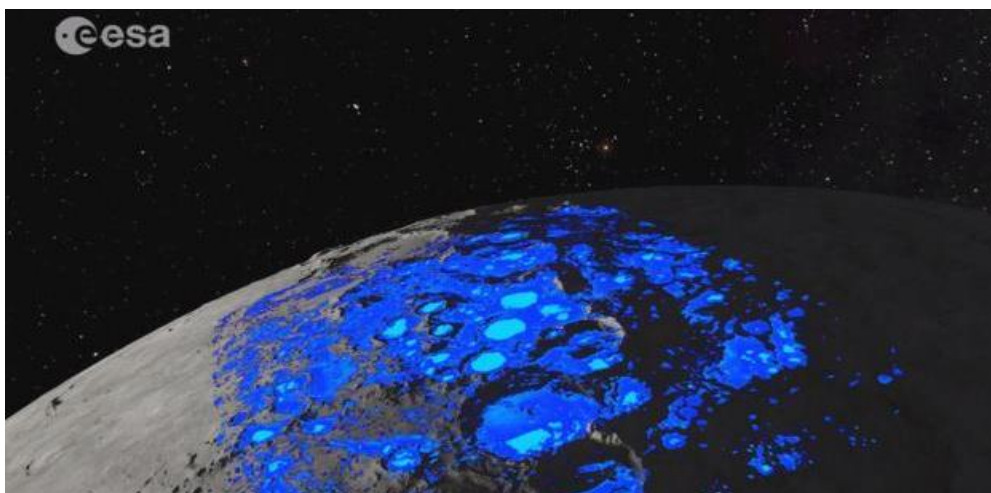
Aujourd'hui, à bord de l'ISS, l'eau est recyclée à 88% (dans ce processus, l'urée est très difficile à recycler). Dans une base extra-terrestre, le recyclage de l'eau sera une fonction fondamentale. D'après les dernières données, l'eau serait abondante sur Mars, essentiellement sous la forme de glace.

Figure n° 4 : DE LA GLACE D'EAU SE SUBLIME SUR MARS APRÈS LE CREUSEMENT D'UNE TRANCHÉE PAR LE ROBOT *MARS PHOENIX*



Sur la Lune en revanche, l'eau ne peut être présente que dans les cratères perpétuellement plongés dans l'ombre, autrement elle se sublime une fois éclairée par le Soleil. Les conditions susceptibles de permettre l'implantation d'une base ne sont présentes qu'aux pôles de la Lune.

Figure n° 5 : PÔLE SUD DE LA LUNE OÙ LA PRÉSENCE D'EAU EST ENVISAGÉE



Cette eau intéresse déjà les agences spatiales : le programme Artemis de la NASA prévoit ainsi de poser ses astronautes au pôle Sud de la Lune. Les sondes chinoises Chang'e 7 et 8, de même, ne vont viser que les pôles. Il va falloir trouver un cratère dans lequel la lumière ne rentre jamais, perpétuellement dans l'ombre, avec la présence de glace d'eau³.

On ignore les conditions de potabilité de l'eau trouvée sur la Lune ou sur Mars, mais il serait néanmoins possible de la distiller et de la minéraliser pour la consommation humaine. Des techniques déjà opérationnelles dans d'autres environnements pourraient ainsi être applicables dans l'espace : par exemple au cours des missions dans les bases scientifiques en Antarctique, l'eau est reminéralisée. Dans les sous-marins nucléaires, l'eau de mer est distillée pour la consommation humaine.

1.2. Les besoins en eau dans l'espace

Pour le dimensionnement de ces systèmes, la NASA a fait des recherches sur les quantités minimales d'eau, d'air et de nourriture nécessaires à la survie des astronautes. Ces *Life Baseline Support Values* ont notamment permis d'évaluer les quantités d'eau nécessaires pour couvrir les besoins de l'équipage (pour la consommation et l'hygiène), et assurer le fonctionnement du véhicule, et ce pour différentes missions.

Les calculs de la NASA évaluent ainsi que les besoins en eau pour une base pérenne sur Mars, comportant notamment une capacité de production agricole pour la consommation humaine, seraient de 9,82 litres par membre d'équipage et par jour, auxquels il faut ajouter 4 litres par

³ David Williams, « Future Chinese Lunar Missions », site de la NASA Space Science Data Coordinated Archive : https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/cnsa_moon_future.html consulté le 2 juin 2021.

mètre carré cultivé par jour pour la production de plantes. Cette quantité est à mettre en perspective par rapport aux 150 litres (environ) quotidiens utilisés actuellement par un habitant d'un pays développé sur Terre : pour une installation pérenne, ces quantités sont à repenser et à adapter par rapport à de nouveaux besoins comme le nettoyage, la lessive, etc.⁴.

Figure n° 6 : TAUX TYPIQUES D'UTILISATION DE L'EAU EN RÉGIME PERMANENT POUR DIVERSES MISSIONS EN KILOGRAMME/MEMBRE D'ÉQUIPAGE/JOUR⁵

Parameter	Units	Devon Island Mars Research Station Study	International Space Station	Transit Vehicle	Early Planetary Base	Mature Planetary Base
Drinking Water	kg/CM-d	2.59	2.00 ⁽²⁾	2.00 ⁽²⁾	2.00 ⁽²⁾	2.00 ⁽²⁾
Food Rehydration Water	kg/CM-d	1.03	0.50 ⁽²⁾	0.50 ⁽²⁾	0.50 ⁽²⁾	0.50 ⁽²⁾
<i>Total Human Consumption</i>	<i>kg/CM-d</i>	<i>3.62</i>	<i>2.50</i>	<i>2.50</i>	<i>2.50</i>	<i>2.50</i>
Urinal Flush	kg/CM-d	0	0.30 ⁽¹⁾	0.30 ⁽¹⁾	0.50 ⁽²⁾	0.50 ⁽²⁾
Personal Hygiene	kg/CM-d	0.46 ⁽⁴⁾	0.4 ⁽²⁾	0.4 ⁽²⁾	0.4 ⁽²⁾	0.4 ⁽²⁾
Hand Wash	kg/CM-d	0.64	n/a	n/a		
Shaving	kg/CM-d	0.05				
Cleaning Science & Engineering	kg/CM-d	0.08				
Shower ⁹²	kg/CM-d	1.08	n/a	n/a	1.08 ⁽⁶⁾	1.08 ⁽⁶⁾
Laundry	kg/CM-d	1.95	n/a	n/a	n/a	1.8 ⁽⁵⁾
Dish Wash	kg/CM-d	3.54	n/a	n/a	n/a	3.54 ⁽⁶⁾
<i>Total Hygiene</i>	<i>kg/CM-d</i>	<i>7.80</i>	<i>0.7</i>	<i>0.7</i>	<i>1.98</i>	<i>7.32</i>
Payload	kg/CM-d		2.18 ⁽¹⁾	TBD ⁽³⁾	TBD ⁽³⁾	TBD ⁽³⁾
<i>Total Payload Consumption</i>	<i>kg/CM-d</i>		<i>2.18</i>			
<i>Total Water Consumption</i>	<i>kg/CM-d</i>	<i>11.42</i>	<i>5.38</i>	<i>3.2</i>	<i>4.48</i>	<i>9.82</i>
Biomass Production Water Consumption ⁹³	kg/m²•d	0.10 ⁹⁴	n/a	n/a	n/a	4.00
Medical water			5 kg plus 0.5 kg/CM-d ⁽²⁾	5 kg plus 0.5 kg/CM-d ⁽²⁾	5 kg plus 0.5 kg/CM-d ⁽²⁾	5 kg plus 0.5 kg/CM-d ⁽²⁾

⁴ Site web du centre d'information sur l'eau : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/la-consommation-deau-domestique-est-elle-la-meme-a-travers-le-monde/>

⁵ Anderson, Molly S., Michael K. Ewert, et John F. Keener, « Life support baseline values and assumptions document », NASA, 2018.

2. L'alimentation dans l'espace

2.1. Life Baseline Support Values

Des chercheurs de la NASA ont établi dans les « *Life Baseline Support Values* » des données de références en termes d'alimentation des membres de l'équipage pour des voyages de courte durée. Ainsi, cette étude permet d'évaluer les quantités minimales nécessaires à la survie des astronautes, et ce selon les types de nourriture (déshydratée, emballée). Un tableau présenté dans l'étude de la NASA décrit ainsi, pour un voyage de 10 jours, les masses nécessaires de nourriture et l'énergie fournie. Cependant, ces quantités sont à adapter au voyage de longue voire très longue durée, et sont donc à repenser.

Figure n° 7 : UN MENU DE 10 JOURS POUR LES MISSIONS DE COURTE DURÉE⁶

Mission Day	Mass, kg	Energy, MJ	Rehydration Water, liters (l)
1	1.60	12.41	2.99
2	1.68	13.01	2.67
3	1.45	12.41	2.45
4	1.26	12.33	2.67
5	2.04	13.27	2.31
6	1.38	12.37	2.81
7	1.82	13.21	2.16
8	1.16	11.97	2.70
9	1.23	12.36	2.52
10	1.68	12.53	2.72

2.2. Agriculture spatiale

La culture des plantes devra permettre, dans une colonie extraterrestre, de :

- ➔ alimenter les habitants, y compris les animaux ;
- ➔ produire des plantes médicinales ;
- ➔ participer au recyclage de l'atmosphère et à la dépollution ;
- ➔ contribuer au confort psychologique des occupants.

2.2.1. Méthodes existantes

Les astronautes ont fait pousser des plantes dans l'espace dès la première station spatiale. Les Soviétiques en particulier cultivaient des fleurs à la fois pour des raisons scientifiques, mais également comme passe-temps.

Récemment, la Station spatiale internationale a fait la une des journaux grâce à la première salade cultivée et consommée dans l'espace.

⁶ *Ibid.*, p. 118.

Les connaissances sur l'agriculture spatiale restent aujourd'hui très insuffisantes malgré de nombreuses expériences sur Terre et dans l'espace. La viabilité de ce type de production de nourriture n'est pas encore établie, et l'agriculture sur d'autres corps célestes demandera vraisemblablement de nombreux développements techniques et la conception de méthodes originales.

Des expériences ont déjà été menées sur l'agriculture dans l'espace, avec par exemple la *Lunar Greenhouse* (LGH) conçue par la NASA et des universités partenaires. Ce prototype de serre lunaire est un *Bioregenerative Life Support System* (BLSS), une serre hydroponique innovante de croissance de plantes. En plus de la production de nourriture, un BLSS typique utilise les plantes et les cultures pour sécuriser aussi le renouvellement de l'air, le recyclage de l'eau et le recyclage des déchets. La finalité première de la *Lunar Greenhouse* est d'assurer le maintien d'un régime végétarien continu pour les astronautes. La LGH aspire également à fournir une technologie prête à être commercialisée sur Terre.⁷

Figure n° 8 : CHAMBRE DE LA LUNAR GREEN HOUSE



Le système **Veggie** (*Vegetable Production system*) a été créé par ORBITEC dans le cadre du programme *Small Business Innovation Research* (SBIR) de la NASA. Nécessitant seulement 70 W – lumière, ventilation et contrôle électronique compris –, ce système permet la croissance de 8 types de laitues à haute densité nutritive au sein de l'ISS. L'expérimentation sur les plantes débute en plaçant le tapis racinaire sur la plaque support de Veggie, puis le coussin végétal (sachet d'enracinement contenant du substrat et de l'engrais) est étiré et placé sur le dessus du tapis racinaire. De l'eau est injectée dans le coussin végétal, puis dans le tapis racinaire. Des mèches végétales sont insérées et des graines sont placées à l'intérieur et orientées de sorte que les racines poussent dans le sac et que la tige émerge. Les mèches transportent l'eau jusqu'aux graines qui sont collées à l'intérieur. La combinaison de l'eau et de la lumière déclenche la germination.

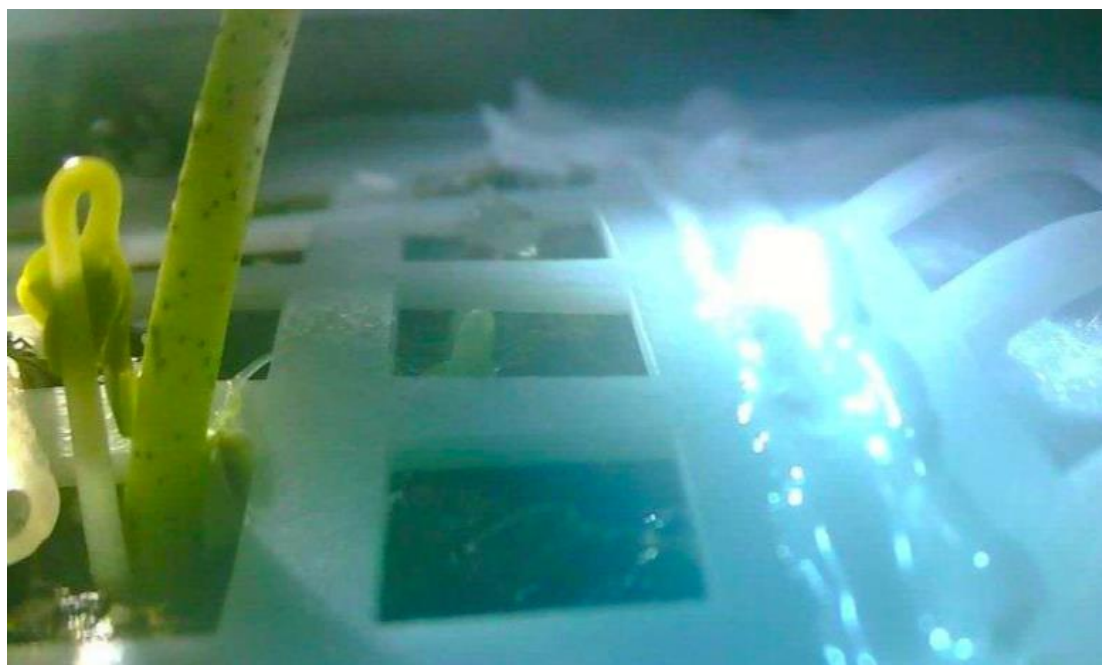


Figure n° 9 : ASTRONAUTE PEGGY WHITSON (NASA) DURANT LA RÉCOLTE ET LE NETTOYAGE DU VEG-03 DANS LE NŒUD 2 DE L'ISS

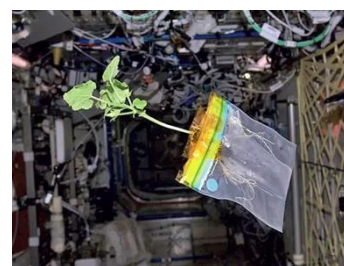
⁷ University of Arizona, *UA-CEAC Prototype Lunar Greenhouse*, 2009 – <https://cals.arizona.edu/lunargreenhouse/>. Consulté le 21 janvier 2021.

En 2019, lors de la mission lunaire Chang'E-4 sur la face cachée de la Lune, la Chine a expérimenté un écosystème complet avec des graines de plusieurs variétés. L'expérience a permis pour la toute première fois de faire germer des graines de coton sur la lune.

**Figure n° 10 : PREMIÈRES GRAINES DE COTON AYANT GERMÉ
SUR LA LUNE DURANT LA MISSION CHANG'E-4**



Ces graines n'ont pas survécu aux nuits glaciales de la face cachée de la Lune qui peuvent descendre jusqu'à -170 degrés Celsius. Les autres graines, levures et œufs de mouche placés dans la boîte hermétique n'ont pas pu poursuivre leur croissance. L'Agence spatiale chinoise a donc annoncé la fin de l'expérience, qui a néanmoins permis de contribuer grandement à l'avancement des recherches scientifiques en matière d'agriculture spatiale.⁸



Serres expérimentales et croissance des plantes à bord des stations orbitales soviétiques, de gauche à droite : Saliout-6 (années 1970), Saliout-7 (années 1980) et Mir (années 1980 et 1990). Toutes ces expériences avaient permis de constater la croissance rapide des plantes. Par ailleurs, en apesanteur, les parties supérieures des plantes s'orientent vers les sources d'éclairage.

⁸ Xavier Demeersman, « Chang'e 4 : les plantes qui ont poussé sur la Lune n'ont pas survécu au froid », *Futura Sciences*, 17 janvier 2019. Accessible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/change-4-change-4-plantes-ont-pousse-lune-nont-pas-survecu-froid-74662/>, consulté le 26 janvier 2021.

2.2.2. Méthodes potentielles d'agriculture spatiale

A. Agriculture classique

La présence de plantes suscite des contraintes :

- ➔ Elle induit des risques biologiques ;
- ➔ Elle nécessite du temps humain ;
- ➔ Elle nécessite des infrastructures complexes :
 - ⇒ Énergie lumineuse ;
 - ⇒ Besoin de régénération du substrat (les éléments nutritifs pour la plante) ;
 - ⇒ Volume d'espace occupé.
- ➔ Elle nécessite de s'intéresser également aux possibilités offertes par les biotechnologies de modification génétique ;
- ➔ Elle implique de prendre en compte la reproduction des plantes, leurs mutations et leur sélection.

Cependant, la question des apports nutritifs pour la plante demeure un problème, il n'est pas certain que seuls les déchets organiques humains suffisent. Le calcium est présent sur la Lune et sur Mars, mais ni le phosphore ni l'azote ne le sont en quantités suffisantes.

Les plantes destinées à l'alimentation nécessiteront d'avoir un bon rendement. Or les plantes sauvages, qui sont généralement plus résistantes, ont un rendement plus faible⁹. Il faudra trouver un équilibre et s'adapter aux contraintes de l'environnement de la base.

Tableau n° 1 : RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTS TYPES DE CULTURE

Type de culture	Besoin	Processus	Recommandation	+	-
Culture hydroponique	Eau Solution nutritive	- Absorption en petite quantité - Purification par la plante	- Études des plantes en système clos - Radiobiologie - Fermes urbaines	- Eau optimisée au maximum (pas d'excès, ni sécheresse) - Nécessite peu d'entretien - Moins d'eau	Consomme + d'énergie Nécessite un support de croissance (bâche, poche à substrat)
Agriculture cellulaire (ou acellulaire)	- Cellules souches variées / microorganismes - Hormones et facteurs de croissance - Sérum nutritif	Production de viande in-vitro à partir de cellules souches/Production de protéines par les microorganismes	Études de rentabilité coût/production	-Source de protéines simple à reproduire	Consomme + d'énergie

⁹ Lettre d'information numéro 3 sur le site de l'INRIA, 2014, p. 2 : <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/smach-lettres-d-information-no3-4-5-7-8-11.pdf> consulté le 21 Juin 2021.

Type de culture	Besoin	Processus	Recommandation	+	-
Culture d'algues	Micro algues	- Photosynthèse (respiration) Voir projet MelISSa - Fermentation en conteneurs fermés	- Études comparatives des ressources martiennes	- Permet recyclage CO2 - Huile d'algue (plastique) - Résistance aux rayonnements	Coût encore élevé
Élevage d'insectes	Système d'alimentation hiérarchique (plantes, espèce, sous espèce)	Élevage en système clos de différentes espèces	- Étude d'élevage d'insectes dans environnements analogues	- Rendement alimentaire + - Qualités nutritionnelles - Moins d'émissions de gaz	- Aspect et goût - Possibilité parasites
Aquaponie	Eau Apports nutritifs complémentaires pour poissons	- Bacs de plantes et bassins - Culture à base des nitrates (déjections de poissons)	- Développer échange dans communauté scientifique - Réaliser expériences + variées	- Eau boucle fermée - Système auto-régénérateur (en circuit fermé) - Peu d'eau consommé	- Manque recherche/études fiables

Des super-plantes martiennes ?

Certaines plantes pourraient être plus intéressantes que d'autres pour la culture sur Mars. La plupart des graines des plantes survivent aussi au vide spatial, mais ne peuvent pas germer. Cette particularité pourrait cependant faciliter leur transport. Cependant en Islande, certaines plantes de type lichen poussent sans substrat végétal, sur de la roche volcanique. Certaines caractéristiques pourraient-elles être adaptées à leur culture en plein air sur Mars ?

Aucune plante connue n'est capable de supporter le gel martien, ni les radiations qui stérilisent la surface de la planète. Les organismes connus les plus résistants sont les lichens, une association symbiotique d'une algue unicellulaire et d'un champignon. Certains animaux comme les rennes sont capables de les consommer. Les lichens sont capables de survivre au vide spatial, mais on ne sait pas s'ils peuvent s'y développer. Si leur culture sur Mars est possible, ils pourraient servir à l'agriculture locale en tant qu'engrais, à l'alimentation pour certaines variétés de lichen comestibles, voire peut-être aider à amorcer la terraformation de la planète.

B. Alimentation de synthèse

L'éloignement de la Terre pourrait conduire les occupants d'une base extraterrestre à développer des procédés disruptifs pour produire leur alimentation.

► Viande in vitro – Agriculture cellulaire

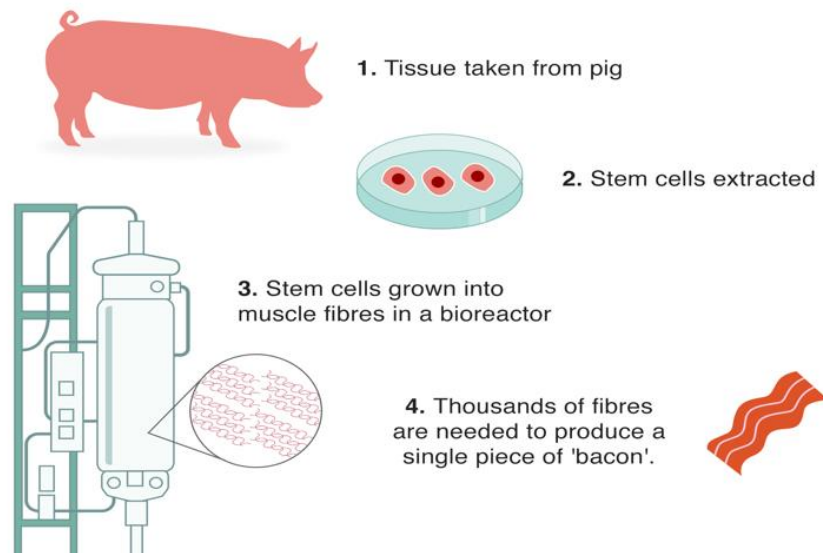
La production d'aliments *in vitro* consiste à produire des aliments ou nutriments consommables à partir de cellules souches ; ces aliments constituent aussi ce qu'on appelle la « nourriture de synthèse ». Cette technologie semble maîtrisée par les États-Unis et Israël qui produisent déjà expérimentalement de la viande *in vitro*. Mais des freins subsistent pour étendre

cette production à une échelle industrielle. Beaucoup de recherches seront nécessaires pour adapter les techniques de production et développer ces aliments de synthèse pour les occupants d'une base extraterrestre.

Avantages	Inconvénients
Pas d'élevage animal	Le temps de croissance n'est pas maîtrisé
Production presque illimitée à partir de cellules souches	L'acceptabilité sociale de la consommation de viande <i>in-vitro</i> sans vascularisation est un frein à la commercialisation d'une telle technologie
Introduction possible de médicaments (comme les antibiotiques) dans les aliments de synthèse	La quantité de cellules souches et le dimensionnement des unités de production nécessaire à l'alimentation des colons ne sont pas connus.
Pas de risque épidémique	Nécessite un support nutritif de croissance dont il faut s'assurer de la disponibilité

Figure n° 11 : SCHÉMA DE PRODUCTION DE VIANDE *IN VITRO* À PARTIR DE CELLULES SOUCHES ANIMALES

How to make artificial meat



► Agriculture acellulaire

Les méthodes de production dites acellulaires font appel aux techniques de biologie synthétique. Au lieu de faire proliférer des cellules vivantes comme pour la production de viande *in vitro*, on utilise des micro-organismes vivants (levure, bactéries, algues, champignons...) afin de synthétiser directement les molécules/protéines recherchées, ce qui peut être comparé au brassage de la bière.

Ce procédé est utilisé depuis de nombreuses années dans l'industrie agroalimentaire pour produire par exemple des enzymes (présure dans le fromage). Il s'agit d'un processus de fermentation. Une illustration de ce principe est donnée par la start-up Solar Food. Celle-ci développe un nouveau type de protéines obtenu par un procédé de fermentation bactérienne associé à un dispositif d'électrolyse alimenté par énergie solaire qui permet de récupérer et d'utiliser le carbone du gaz carbonique. Produite hors-sol dans des réacteurs, cette protéine est sans impact carbone. L'ingrédient obtenu est composé de 50 % de protéines, incluant tous les acides aminés essentiels, 5-10 % de matières grasses et 20-25 % de glucides, pour un goût proche de la farine de blé. Pour en produire 1 kg, il faut apporter 10 litres d'eau, des nutriments et des vitamines.

► Impression 3D alimentaire

La technologie d'impression 3D alimentaire permettra, à partir des ingrédients disponibles sur place (qu'ils viennent de la Terre ou de la production locale), de recomposer des aliments et des plats qui apporteront une dimension agréable à l'alimentation.

Il sera également possible d'ajouter lors d'impression, des vitamines, oligo-éléments, composés médicamenteux en proportion et quantité adaptées aux besoins de chaque individu, rendant possible une alimentation ultra-personnalisée couplée au monitoring de la santé de ces personnes.

Figure n° 12 : UNE PIZZA FABRIQUÉE PAR IMPRESSION 3D À PARTIR D'ALIMENTS GÉNÉRIQUES QUI POURRAIENT ÊTRE TRANSFORMÉS SELON LE SOUHAIT DES ASTRONAUTES



3. Recommandations pour les systèmes de support-vie

- ▶ Intensifier la recherche sur les systèmes de support-vie en boucle fermée et analyser l'intérêt d'un système en boucle fermée par rapport à un système en boucle semi-ouverte (en particulier vis-à-vis de l'utilisation de ressources sur place.)
- ▶ Recherche des techniques de purification/distillation et reminéralisation de l'eau extraterrestre.
- ▶ Réévaluer les besoins en nourriture, en eau et en air nécessaires par personne et par jour dans la perspective d'une installation pérenne.
- ▶ Étudier l'adéquation des ressources exploitables sur Mars avec les besoins physiologiques des plantes.
- ▶ Simuler la production de plantes dans les conditions d'exploitation permises en environnement lunaire ou martien.
- ▶ Simuler la croissance des plantes sur différents sols extraterrestres.
- ▶ Étudier l'apport des lichens pour l'agriculture à la surface de Mars.
- ▶ Approfondir les usages des plantes pour une colonie spatiale (agriculture nutritive, dépollution, confort psychologique, ressources thérapeutiques, etc.).
- ▶ Définir la méthode de culture la plus adaptée pour l'exploitation agricole sur d'autres corps célestes.
- ▶ Étudier l'intérêt des technologies d'alimentation de synthèse pour les bases extraterrestres : viande *in vitro*, agriculture acellulaire, impression 3D alimentaire.
- ▶ Évaluer l'usage des plantes pour la construction des habitats (habitat « techno » vs habitat « vivant » et biomimétisme).
- ▶ Étudier les matériaux issus du vivant pour les applications spatiales.
- ▶ Étudier le recyclage extrême autour de la notion de « verre d'eau pour une douche ».
- ▶ Créer une base de données et d'études permettant un inventaire et un panorama de l'existant en matière de connaissances et d'expérimentations sur les support-vie.

Médecine Spatiale

1. Contraintes médicales de la vie sur Mars

La vie sur Mars pose de nombreuses contraintes médicales telles que :

- L'absence de possibilités de rapatriement ;
- La nécessité d'un entraînement intensif aux gestes médicaux ;
- Des délais importants pour la télémédecine, en particulier pour la manipulation des robots en temps réel ;
- La question des radiations, et notamment le traitement des dommages tissulaires ;
- L'Alternance de 1 G, micro G et G partiel ;
- La poussière ;
- La variété de gaz existants ;
- Les conséquences d'une vie en milieu confiné, notamment l'évolution rapide de pathogènes, ainsi qu'une immunité réduite ;
- L'impact psychologique (cette dimension sera développée dans le chapitre suivant) ;
- Difficile maintien des compétences médicales sur le long terme ;
- Les problèmes de maintenance des équipements médicaux, à la fois en termes de pièces de rechange et de compétences ;
- La gestion des consommables et des produits à durée de péremption courte tels que les réactifs de laboratoire et certains médicaments.

2. Actions médicales préventives et curatives à distance

De la sélection physiologique des candidats à l'implantation de la vie humaine sur Mars, les médecines préventive et curative joueront un rôle majeur. Les opérations médicales préventives et curatives pourraient être individualisées jusqu'à un certain point et en fonction de la population de la base.

2.1. Médecine préventive : maintien de la condition physique

2.1.1. Contres mesures physiques

- ➔ L'activité physique demeure une composante fondamentale.
- ➔ Les contre-mesures peuvent être de nature mécanique (exercice physique avec utilisation d'une machine ou non), pharmacologique ou nutritionnelle.
- ➔ Il existe des risques de pertes calciques ainsi que de développement de possibles syndromes oculaires dont on ignore encore les caractéristiques.

Figure n° 13 : CONTRÔLE OCULAIRE PRÉVENTIF D'UN DES MEMBRES DE L'ÉQUIPAGE DE MARS500¹⁰



Le maintien de la condition physique constituera la première priorité. Il faudrait ainsi étudier l'ensemble des fonctions physiologiques, la VO2 max, et les exercices aux coûts énergétiques importants. La vie sur Mars peut faire chuter la masse corporelle des colons, puisque les astronautes mangent moins que sur Terre, d'où l'importance de la recherche sur les moyens de lutter contre cette évolution, y compris les activités physiques à pratiquer.

2.1.2. Un monitoring médical continu

Un élément clé de médecine préventive comportera le monitoring physiologique en temps réel des colons. Il y a un besoin de capteurs, à partir de textiles intelligents, qui permettent le suivi de l'évolution des hormones, des gaz, de la qualité du sommeil, des constantes sanguines et des pouls, ou des sondes *in-vivo* si l'éthique le permet. Les nouveaux capteurs biologiques tels que les patches électroniques et l'énergie cellulaire sont également à envisager.

Ces systèmes automatiques surveilleraient en permanence les astronautes et émettraient des alertes en cas de « dysfonctionnement » (pathologies). En fonction de l'urgence ou de la gravité du problème, le médecin (humain ou robot) serait assisté en permanence par une équipe sur la Terre. Cette intervention ne pourra cependant pas se faire en temps réel en raison des temps de transmission entre la Terre et Mars.

¹⁰ Site officiel de la mission Mars500 – http://mars500.imbp.ru/en/gallery/520_medical_select.html, consulté le 21 janvier 2021.

**Figure n° 14 : RENFORCEMENT MUSCULAIRE
À BORD DE LA MISSION EXPÉRIMENTALE MARS500**



2.1.3. Sélection physiologique des candidats

Pour la sélection des astronautes, la radio-susceptibilité¹¹ devra sûrement être prise en compte, car les êtres humains ne sont pas égaux vis-à-vis de celle-ci. Il faudra également développer des médicaments radio-protecteurs permettant de supporter les radiations pendant de plus longues durées. Si l'éthique le permet, il serait également intéressant de procéder à des analyses génétiques pour détecter en amont s'il existe une prédisposition génétique pour certaines maladies. Il serait intéressant d'étudier la thérapie génique et les solutions potentielles envisageables. Cependant, dans la sélection des candidats, la prise en compte des co-facteurs de risques spécifiques à Mars comme la pesanteur réduite, qui pourraient induire d'autres risques de réaction par rapport aux radiations, est primordiale.

2.2. Médecine curative

2.2.1. Besoin en compétences médicales

Après la médecine préventive qui permet un suivi et une meilleure préparation des astronautes à ce voyage de longue durée, il est également primordial d'assurer une médecine curative. Par exemple, il sera important d'envisager le traitement de pathologies et la chirurgie à distance¹². La télémédecine nécessitera de nombreux modules de développement de diagnostic. Mais il est possible de former des médecins en amont en leur proposant un parcours à visée astronautique. Cela impliquerait la maîtrise de nombreuses compétences permettant de réaliser *in situ* des examens d'investigation, des actes chirurgicaux et l'administration de traitements thérapeutiques, y compris ceux de dernière génération : culture de cellules souches individualisées, traitement des lésions et fracture des membres grâce à l'impression

¹¹ Sensibilité biologique aux radiations ionisantes.

¹² Le CHU de Marescu à Strasbourg possède une expertise en la matière.

3D (impression d'attelles, plâtres, prothèses) par exemple. Il devrait y avoir à bord de chaque vaisseau partant pour de longues durées, au moins un médecin et un assistant très formés.

Figure n° 15 : SYSTÈME ECHO : ÉCHOGRAPHIE MANOEUVRABLE À DISTANCE, ACTUELLEMENT TESTÉE À BORD DE L'ISS¹³



Il y a un intérêt certain à mettre en place des expérimentations dans des environnements analogues, afin de prévoir au mieux les réactions physiologiques auxquelles les astronautes et les équipes de soutien devront faire face. À titre d'exemple, les études sur les Bedrest¹⁴ attestent de leur efficacité à bord de l'ISS, mais pour évaluer les solutions à mettre en place dans le cadre d'un voyage très long ainsi que de l'implantation de la vie sur Mars, il faut désormais envisager des expérimentations en utilisant des environnements analogues plus intégrés tels que Concordia. Ils permettent en effet de reproduire le confinement, déconditionnement, ou encore l'isolement.

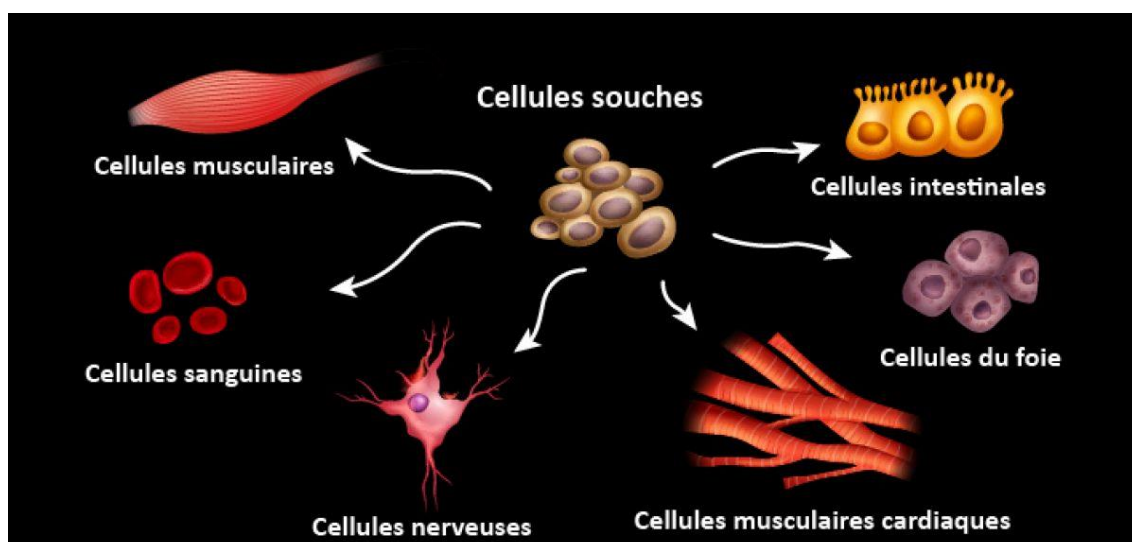
2.2.2. Le matériel médical

Les progrès scientifiques et technologiques (en particulier grâce à la miniaturisation électronique et aux nanotechnologies) permettront d'obtenir de nouveaux équipements d'exploration du corps humain à brève échéance, venant compléter ceux qui existent déjà. De ce fait, les applications suivantes sont désormais possibles ou envisageables à court terme :

- ➔ Développement des interventions chirurgicales non invasives ;
- ➔ Explorations du corps par des sondes miniaturisées et ultra performantes ;
- ➔ Administration ciblée et libération contrôlée de médicaments ;
- ➔ Réparation du corps humain avec des cellules souches.

¹³ Site du CNES, « La télémédecine décolle ! », 22 mai 2020 – <https://jeunes.cnes.fr/fr/lessor-de-la-telemedecine>, consulté le 24 janvier 2021.

¹⁴ Site de la NASA, « About: envihab », 2 Juin 2021 – <https://www.nasa.gov/analog/envihab/about>



Une cellule souche est une cellule indifférenciée, capable de s'auto renouveler, de se différencier en d'autres types cellulaires et de proliférer en culture. Les applications des cellules souches seraient révolutionnaires pour la médecine. Dans le cas d'une base extraterrestre, les cellules souches s'imposeraient, car elles peuvent servir à régénérer ou recréer des tissus détruits : c'est la thérapie cellulaire.

À un horizon pas si lointain, il sera sûrement possible de miniaturiser les solutions d'investigation et de traitement pour un usage opérationnel, telles que les machines d'IRM et les scanners.

Pour la médecine curative, des techniques qui se développent telles que la régénération des cellules à partir de cellules-souches, mais aussi l'importance croissante de la réalité virtuelle dans la télémédecine.

À court terme, la pharmacie sera constituée essentiellement de comprimés embarqués à bord. Face à l'inévitable péremption de ceux-ci, la recherche pourrait s'intéresser à moyen ou long terme à la fabrication à bord de certains médicaments, à base de plantes ou d'autres substances actives produites au sein de la base.

2.2.3. Les compétences médicales

Une base extraterrestre devra impérativement comporter un médecin et si possible un service médical doté des équipements et instruments les plus modernes¹⁵. Par exemple, lors de la simulation Mars-500, parmi les cinq membres de l'équipage, il y avait deux médecins. Ils étaient dotés de nombreux instruments, y compris chirurgicaux. Il faudrait également embarquer des pièces de rechange, voire des systèmes moins sophistiqués mais moins vulnérables aux pannes.



Figure n° 16 : MODULE MÉDICAL DE MARS500¹⁶

¹⁵ Philippe Coué, *Rêves de Mars*, L'esprit du temps, Paris, 2018.

¹⁶ Site officiel de la mission Mars-500. <http://mars500.imbp.ru/en/gallery/nek.html>. Consulté le 21 janvier 2021.

Il faudrait une formation médicale pour chaque personne partant en expédition. Pas besoin pour autant d'une formation complète, mais plusieurs médecins devront avoir des connaissances en intervention chirurgicale dans des domaines différents.

Les soins dentaires dans l'espace

Afflictions fréquentes, les problèmes dentaires sont souvent très douloureux et peuvent avoir des conséquences importantes pour la santé pouvant aller jusqu'à la septicémie. Quelques problèmes dentaires sérieux ont été recensés au cours de l'histoire de l'exploration spatiale, dont l'un à bord de la station Salyut-6 qui a nécessité le retour sur Terre du cosmonaute Yuri Romanenko. Les abcès dentaires sont considérés comme une des raisons les plus probables nécessitant le retour d'un astronaute de l'ISS. À l'heure actuelle, les possibilités de traitement dentaire dans l'espace sont très limitées et reposent essentiellement sur des mesures temporaires, comme le traitement d'une carie. Avec l'augmentation de la durée des missions et l'augmentation du nombre de participants, la survenue d'urgences dentaires et de problèmes plus lourds à traiter devient une quasi-certitude. Des études sont actuellement conduites sur la possibilité d'utiliser des scanners et des imprimantes 3D pour réaliser des prothèses dentaires en fonction des besoins qui pourraient émerger lors des missions lointaines.

**Figure n° 17 : SIMULATION D'INTERVENTION DENTAIRE
À BORD DE LA STATION SKYLAB**



3. Gestion de crise médicale dans l'espace

Plusieurs scénarios de crise sont susceptibles de survenir dans des bases spatiales pérennes. La présence d'humains dans un espace confiné a toujours posé des problèmes sanitaires au cours de l'histoire, et il n'y a pas de raison de penser que l'espace y fera exception. La découverte en 1998 de nombreuses espèces de bactéries potentiellement dangereuses à bord de la station indique bien que l'humain ne sera pas la seule forme de vie à pouvoir se développer dans l'espace. L'émergence de crises sanitaires, y compris d'origine infectieuse, n'est donc pas un scénario inenvisageable, et doit être considéré avec attention.

3.1. Crise sanitaire due à un agent pathogène

L'éloignement des bases spatiales pourrait empêcher tout rapatriement d'urgence de malades infectés par un agent pathogène. Outre la mise en œuvre des soins et traitements, les mesures à prendre devront généralement reposer sur un isolement des malades pour les maladies contagieuses, mais également d'un isolement de toutes les fonctions de support-vie des malades : la gestion des déchets et les systèmes de recyclage devraient tous être isolés pour éviter de contaminer la population saine et l'environnement.

Ces mesures ont des conséquences importantes sur l'architecture de la base et l'architecture du support-vie. La possibilité de développer des systèmes de support-vie pour un petit groupe de personnes, voire des systèmes de support-vie individuels qui établiraient un cycle de recyclage hors du cycle général, pourrait être étudiée. Les mesures de confinement dans ce cas pourraient arriver à des extrêmes inconnus dans notre société actuelle : renouvellement d'atmosphère, isolement parfait, etc.

3.2. Procédure en cas de mort d'un membre d'équipage

Au cours de missions de longue durée ou pérennes, la mort sera un phénomène quasiment inévitable. La gestion d'un cadavre sur un autre corps céleste posera vraisemblablement des problèmes. Des funérailles sur place pourraient avoir un effet délétère en termes de protection de l'environnement planétaire¹⁷ (en particulier sur Mars), mais la conservation des corps au sein d'une base pourrait rapidement générer des risques sanitaires. L'incinération des corps pourrait être une bonne solution, mais l'usage de feu dans une base spatiale pose de très nombreux problèmes de sécurité. Malgré de nombreuses idées intéressantes, le sujet n'est pas tranché par les agences spatiales, qui n'ont jusqu'alors jamais eu à gérer le cas d'un décès dans l'espace¹⁸.

Par ailleurs, la gestion de la mort relève de considérations non seulement scientifiques et techniques, mais également éthique, culturelle et religieuse. L'acceptation des mesures à suivre à la suite de la mort d'un membre d'équipage risque de s'en trouver affectée : vaut-il mieux enterrer le corps, l'incinérer ou le rapporter sur Terre pour lui offrir des funérailles terrestres ? Ceci pose la question de l'introduction de la religion sur d'autres corps célestes. La raison de la mort importera ainsi grandement : si la mort est survenue à la suite d'une exposition à un agent pathogène ou radioactif, cela pourrait rendre la manipulation et la conservation du corps complexes. Si la mort est survenue de façon aberrante, cela pourrait impacter directement l'acceptabilité des voyages spatiaux dans leur ensemble.

Des procédures devront vraisemblablement être mises en place avant le départ de la mission et laisser peu de marge de manœuvre à l'équipage pour ce cas précis.

¹⁷ Définition de la protection planétaire sur le site de la NASA : <https://sma.nasa.gov/sma-disciplines/planetary-protection/> consulté le 21 juin 2021.

¹⁸ La question des funérailles ne s'est pas posée pour les accidents mortels qui se sont produits au cours de l'exploration spatiale (Apollo 1, Soyouz 1, Soyouz 11, Challenger, et Columbia). Les corps ont en effet pu être récupérés au sol.

4. Pistes d'évolutions des travaux

Deux thèmes controversés ont été brièvement abordés en réunion :

- ▶ La naissance d'enfants dans une colonie extraterrestre¹⁹ ;
- ▶ La « transformation des astronautes » pour qu'ils soient mieux adaptés à l'environnement spatial.

5. Recommandations pour la médecine spatiale

- ▶ Le groupe recommande d'intensifier les expériences sur les animaux, avec notamment les biosatellites russes qui permettent des études à une altitude de 1 000 km.
- ▶ Développer des méthodes non-invasives de surveillance permanente de la santé physique des astronautes, par exemple à partir de capteurs biologiques tels que des patches électroniques.
- ▶ Miniaturiser les équipements d'exploration tels que les scanners et les IRM pour un emport dans l'espace.
- ▶ Développer des protocoles de sélection incluant une mesure de la radio-susceptibilité des candidats.
- ▶ Étudier les techniques de traitement et de chirurgie à distance applicables aux autres corps célestes, notamment à partir de solutions de réalité virtuelle.
- ▶ Étudier des interventions chirurgicales non invasives, des techniques d'explorations du corps miniaturisées ainsi que le potentiel de réparation du corps humain à partir de cellules souches.
- ▶ Intégrer à des environnements analogues tels que les sous-marins et les bases antarctiques des études physiologiques de type *bedrest* et également de confinement pour simuler une expédition de longue durée.
- ▶ Développer les techniques de traitement d'affections dentaires dans l'espace, notamment l'impression 3D de couronnes et de plombages.
- ▶ Concevoir l'architecture des bases autour de la possibilité de diffusion d'un agent pathogène.
- ▶ Mettre en place des procédures strictes à suivre en cas de décès.
- ▶ Compléter la pharmacopée par des plantes médicinales cultivées sur d'autres corps célestes.
- ▶ Intensifier la R&D sur des technologies et des usages de rupture (physique quantique, microbiotes, microchirurgie, etc.).

¹⁹ À la fin des années 1960, Wehrner von Braun envisageait très sérieusement que des enfants puissent naître sur la Lune avant la fin du XXe siècle. Des bases lunaires étaient alors encore envisagées par la NASA à la suite du programme Apollo.

Radiations

1. Caractéristiques des radiations spatiales

Dans l'espace, astronautes et matériels sont exposés essentiellement au rayonnement cosmique qui est formé de particules chargées de haute énergie, majoritairement des protons, alpha et ions plus lourds. Il est constitué de deux composantes, la première d'origine galactique, plutôt stable, la seconde produite par le Soleil, plus fluctuante. Cette composante varie en fonction de l'activité solaire qui suit un cycle moyen de onze ans ; de plus des éruptions sporadiques, durant quelques heures, peuvent générer des flux très importants de protons.

Le rayonnement cosmique dit « primaire » va interagir avec les matériaux rencontrés (constituants de l'atmosphère, tissus du corps humain, différents matériels, habitations...) et créer des particules secondaires qui peuvent être de nature et d'énergie différentes (neutrons...).

Le rayonnement cosmique génère une irradiation et en aucun cas une contamination comme cela est parfois évoqué²⁰.

Figure n° 18 : L'ATMOSPHÈRE MARTIENNE EST TROP TÊNUE POUR PROTÉGER EFFICACEMENT DES RADIATIONS SOLAIRES



Sur la Lune, le rayonnement cosmique est semblable à l'espace profond, excepté la nuit durant laquelle l'astre lui-même protège des radiations. Sur Mars, la protection atmosphérique vis-à-vis du rayonnement cosmique est bien moindre que sur la Terre car l'atmosphère martienne est 50 fois moins importante (respectivement 1 000 et 20 g.cm⁻²). De plus, il n'y a pas de champ magnétique qui joue un rôle protecteur en déviant les particules chargées. Les mesures réalisées lors de missions précédentes²¹ montrent des débits de dose trois fois moindre à la surface de Mars (0,6 mSv/jour) que dans l'espace (1,8 mSv/jour).

²⁰ Pour rappel, une contamination se produit lorsque que des radionucléides sont inhalés ou ingérés, on parle alors de contamination interne, ou bien déposés sur la peau, on parle alors de contamination externe.

²¹ Hassler et.al, « Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory », Science, 2013.

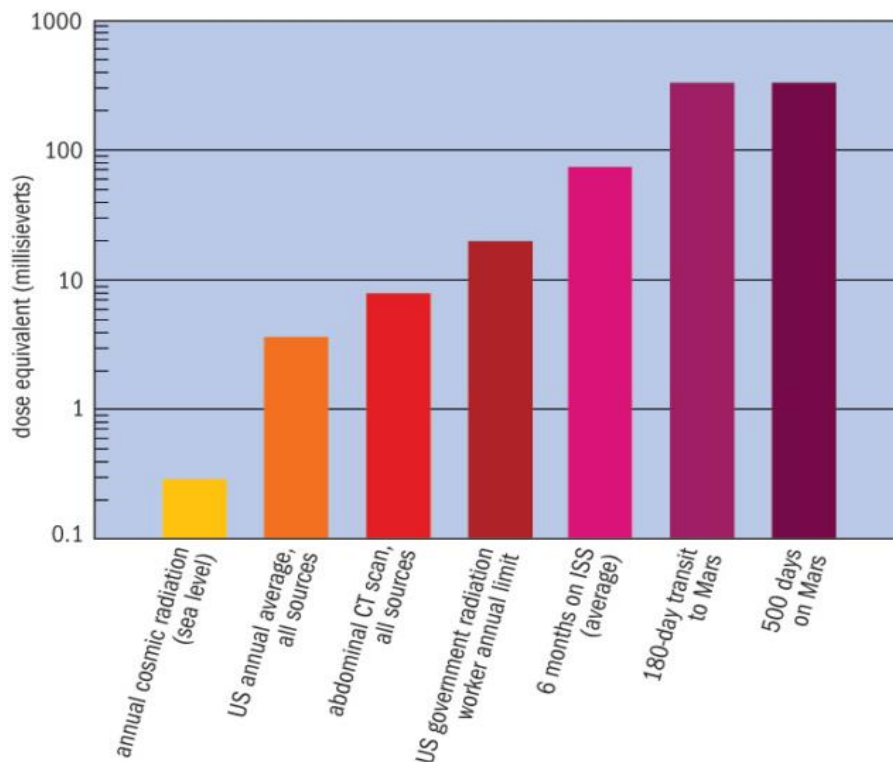
Sans protection particulière, l'exposition au rayonnement cosmique sur Mars conduit à une dose annuelle se situant entre 200 à 300 mSv en fonction de l'activité solaire (hors éruption solaire significative). Cette dose est du même ordre de grandeur que celle susceptible d'être reçue lors d'un trajet Terre-Mars (~300 mSv pour 180 jours) et celle reçue à bord de l'ISS. La dose reçue lors du trajet reste une contribution importante à la dose totale pour des séjours de courte durée. De telles doses conduisent à des effets sanitaires sur l'humain dits « stochastiques » (voir ci-dessous).

Si les éruptions solaires n'ont pas d'effets délétères sur Terre pour la santé, sur Mars, par manque de protection naturelle et sans moyen de protection particulier, elles peuvent générer des doses significatives allant de quelques mSv à plusieurs centaines de mSv, voire milliers pour une éruption exceptionnelle.

Par conséquent, en cas de séjour prolongé sur Mars, il faudra se protéger non seulement du rayonnement cosmique « permanent », mais également des éruptions solaires qui, étant donné leur nature imprévisible, nécessiteront des dispositions contraignantes, notamment en termes de réactivité.

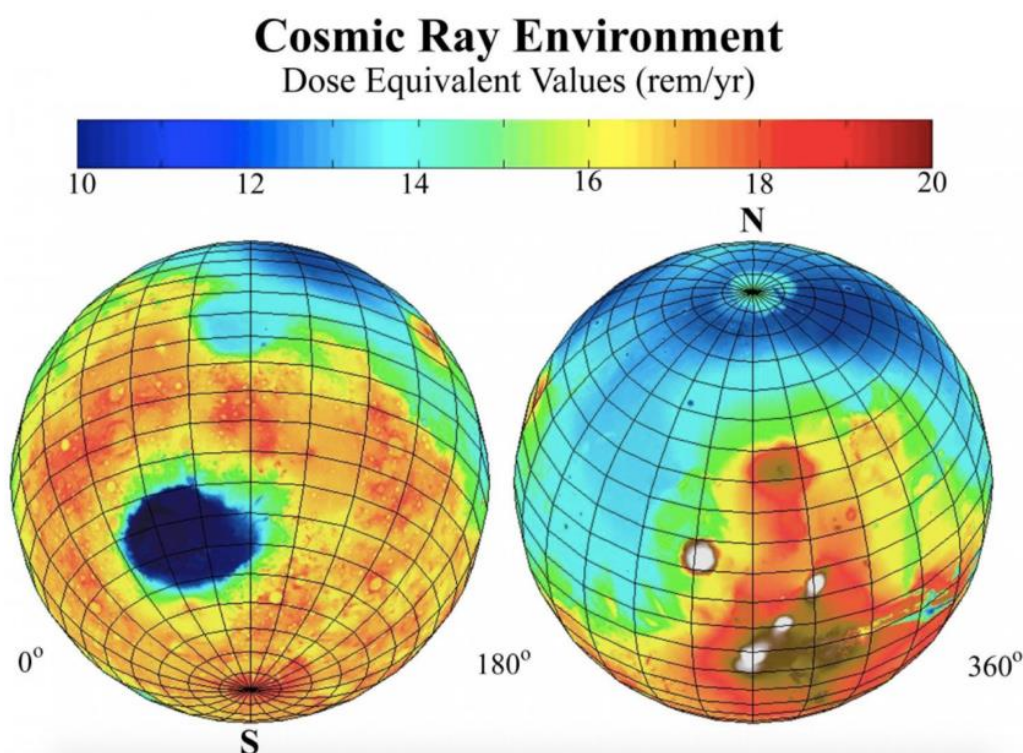
À noter que l'exposition d'origine tellurique devrait être comparable à celle rencontrée sur Terre qui conduit dans la plupart des régions à une dose annuelle d'au plus 1 à 2 mSv. Le cas particulier du radon devra être pris en compte, en particulier dans les règles de construction des habitats, surtout si ceux-ci sont enterrés.

Figure n° 19 : ESTIMATION DE LA DOSE REÇUE POUR DIFFÉRENTES SITUATIONS D'EXPOSITION SUR TERRE ET SUR MARS²²



²² Site de la NASA : https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia17061.html – consulté le 22 juin 2021.

Figure n° 20 : ESTIMATION DES DOSES DUES AU RAYONNEMENT COSMIQUE ATTEIGNANT LA SURFACE DE MARS²³



2. Effets des radiations sur les humains

Les rayonnements ionisants induisent des risques pour la santé. Ils sont appelés ainsi parce qu'ils sont capables d'ioniser, directement ou indirectement, le milieu qu'ils traversent et ainsi créer des radicaux libres qui induisent à leur tour des lésions et réactions cellulaires, notamment des cassures de l'ADN, pouvant conduire *in fine* à des effets biologiques.

La plupart des effets nocifs pour la santé de l'exposition aux rayonnements peuvent être regroupés en deux catégories : les effets « stochastiques » et « déterministes » :

- ➔ Les effets « stochastiques » se traduisent principalement par l'apparition de cancers (cancer solide, plus fréquent, et cancer liquide type leucémie, plus grave). Leur gravité n'est pas proportionnelle à la dose reçue mais leur probabilité d'apparition augmente avec la dose. Une augmentation statistiquement significative du risque de cancer est démontrée par les études épidémiologiques pour des doses au-delà de 100 mSv (excès de risque de développer un cancer d'environ 1% pour une dose de 200 mSv), mais il est admis que ce risque existe aussi pour des doses plus faibles.
- ➔ Les effets « déterministes » (réactions tissulaires nocives) sont dus en grande partie à la mort ou au dysfonctionnement de cellules suite à une exposition à de fortes

²³ Analyse GIS de lieux prometteurs pour l'atterrissage sur Mars, ResearchGate. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Map-of-the-equivalent-dose-values-of-the-Mars-surface-rem-year-Source-https-physorg_fig3_337958459, consulté le 22 juin 2021.

doses (au-delà de 1 000 mSv). Ces effets surviennent de façon certaine dès lors qu'un seuil de dose a été dépassé. Il est admis qu'aucun tissu exposé dans la plage des doses inférieures à 100 mSv (gamme des faibles et très faibles doses selon la dénomination de l'UNSCEAR)²⁴ n'est susceptible de présenter une altération fonctionnelle cliniquement significative. Lorsque le seuil de dose est dépassé, la sévérité des effets augmente avec la dose et, dans une moindre mesure, avec le débit de dose.

Outre les effets stochastiques et déterministes décrits ci-dessus, des effets des rayonnements ionisants à long terme sur le cerveau, le système cardiovasculaire et le cristallin de l'œil ont été observés pour des doses se situant dans la gamme de 100 à 500 mSv. Il doit également être noté les effets tératogènes (malformations) et les atteintes du système nerveux central (retards mentaux) susceptibles d'apparaître pour des doses reçues *in utero* supérieures dans la gamme de 200 à 500 mSv environ.

En conclusion, si l'exposition au rayonnement cosmique n'est pas rédhibitoire pour une vie durable sur Mars, elle est néanmoins dimensionnante car il est nécessaire de répondre en amont à certaines questions concernant les effets attendus ainsi que l'organisation de la vie sur place (*bâtiments, profil des colons, organisation des activités...*).

3. Effets des radiations sur les plantes et l'électronique

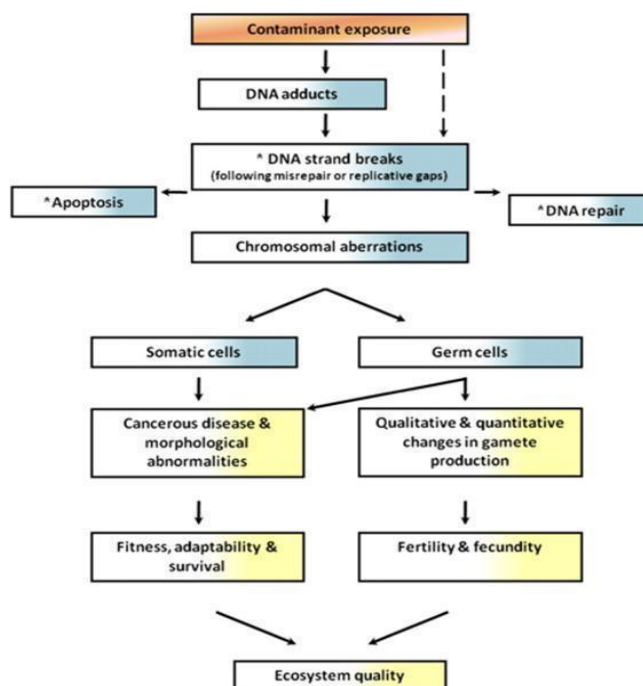
Dans l'espace, les radiations sur les composants électroniques peuvent avoir deux effets : création de défauts dans les structures cristallines des semi-conducteurs par interactions nucléaires avec les composants et/ou des effets par ionisation de ces structures. Il est donc nécessaire de « renforcer » les équipements électroniques par des durcissements matériels et/ou logiques. Les ordinateurs spatiaux disposent déjà de ce type de conception et de blindage, au détriment de leur puissance, qui est équivalente à celle d'ordinateurs d'il y a une ou deux décennies²⁵.

Les plantes sont également sensibles aux radiations qui peuvent conduire à des effets radio-induits. Des recherches sont déjà menées et devraient être approfondies en radiobotanique. La figure 20 ci-dessous illustre les mécanismes d'altération de l'ADN en présence d'un « stresser » qui est comparable à ceux rencontrés chez l'humain. Aujourd'hui des recherches sont menées à bord de l'ISS, dont l'environnement radiatif est assez semblable à celui de Mars. En revanche, il n'y a pas eu d'étude sur l'impact des radiations sur les parties comestibles des plantes : c'est un terrain de recherche à développer.

²⁴ Comité scientifique des nations-unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants.

²⁵ Pour plus de détails, voir l'article de Jacek Krywko sur Ars Technica : <https://arstechnica.com/science/2019/11/space-grade-cpus-how-do-you-send-more-computing-power-into-space/>

Figure n° 21 : ILLUSTRATION DE LA RELATION ENTRE L'EXPOSITION AUX SUBSTANCES CONTAMINANTES ET LA QUALITÉ DE L'ÉCOSYSTÈME²⁶



4. Architecture antiradiation

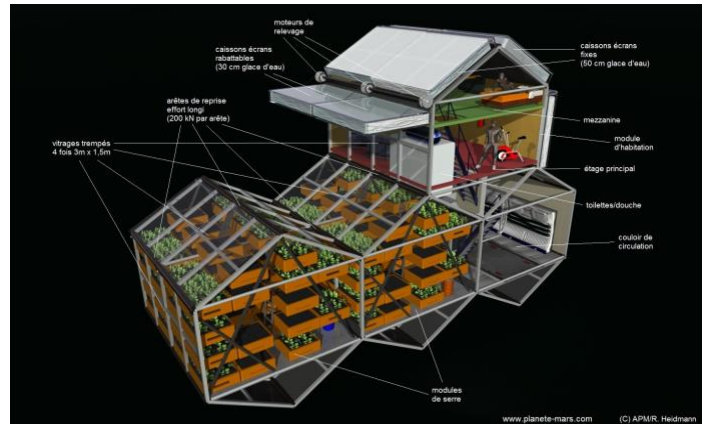
En termes d'architecture antiradiation, plusieurs moyens de protection peuvent être envisagés. La première protection envisagée contre ces radiations est le blindage, dont l'efficacité dépend de l'épaisseur et de la composition. Une plus grande épaisseur de blindage va conduire à diminuer la dose. Le Z (numéro atomique) du matériau de blindage est un paramètre intéressant pour caractériser la capacité des blindages à protéger des radiations. En effet, les matériaux de Z élevés (métaux...) sont efficaces pour atténuer les particules ayant des interactions électromagnétiques (électrons, protons, ions, photons...), alors que les matériaux de Z faibles (eau, polyéthylène...) le sont pour atténuer les particules ayant des interactions nucléaires (neutrons, protons et ions de haute énergie). Le béton a un Z intermédiaire. Pour se protéger efficacement du rayonnement cosmique (protons et ions de haute énergie), la meilleure solution consiste à avoir des matériaux composites de Z élevé et faible.

Étant donné que le rayonnement cosmique interagit avec les matériaux de blindage, des particules secondaires sont générées et passent par un maximum (effet *build-up*) et peuvent conduire à une dose plus élevée à l'arrière d'un blindage qu'à l'entrée si celui-ci n'est pas suffisamment épais. Cet effet se produit dans l'atmosphère terrestre à une altitude d'une vingtaine de kilomètres. C'est également le cas dans les casques des astronautes. Le bon dimensionnement d'un blindage est alors important.

²⁶ Fuller, Neil, et al., « The biological effects of ionising radiation on Crustaceans: A review », *Aquatic Toxicology* 167 (2015): 55-67.

Figure n° 22 : CONCEPT D'HABITAT MARTIEN PROPOSÉ PAR R. HEIDMANN

Dans ce concept d'habitat martien proposé par R. Heidmann de l'Association Planète Mars, des caissons de **glace d'eau** protègent les occupants des radiations tout en laissant passer la lumière.



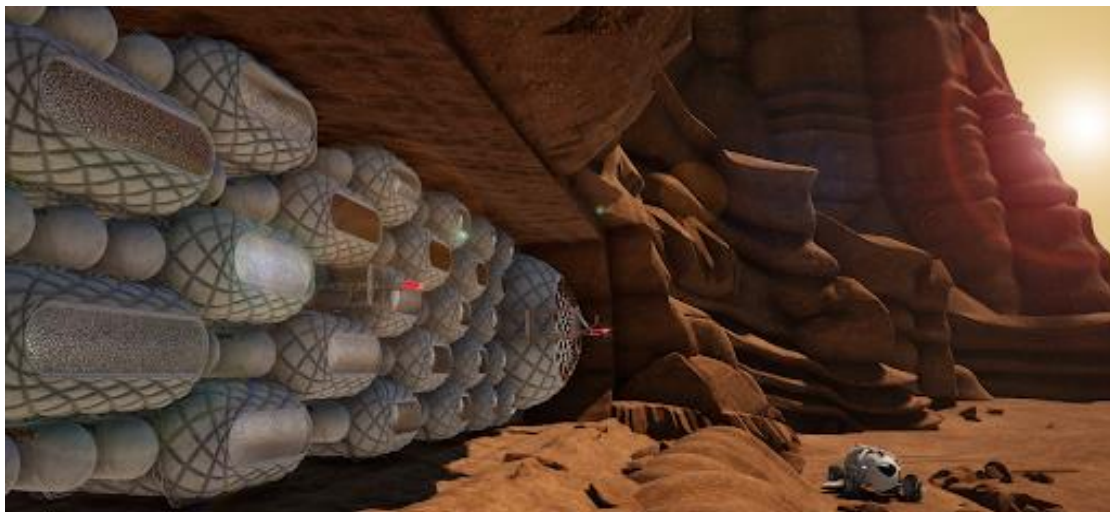
À noter que contrairement à la Terre, sur la face non éclairée de la Lune ou de Mars, l'exposition aux radiations est fortement réduite du fait de l'autoprotection conférée par l'astre et de l'absence de magnétosphère.

Mars offre plusieurs possibilités de vie : soit une vie souterraine, soit une vie troglodyte, soit une vie en surface protégée par des habitats fabriqués sur Terre, soit par des habitats fabriqués sur place. Il y aura sûrement un mélange de ces possibilités. La vie troglodyte et souterraine protège efficacement des radiations, mais ne permet pas la survie des plantes autrement qu'en hydroponie. Pour la vie en surface, il faudrait prévoir des machines-outils capables d'utiliser les matériaux du sol martien, comme le régolithe et l'eau. L'utilisation de matériaux de synthèse devra également être étudiée.

En cas d'éruptions solaires, les doses reçues pouvant être élevées, il faudra disposer de bunkers de protection (creusés en profondeur, cavités naturelles, construction) à portée des astronautes. Un système d'alerte « radiations » efficace et une organisation adaptée devront être mis en place.

Toute technique potentiellement intéressante pour améliorer la protection contre les radiations devra être étudiée : champ magnétique pour des zones extérieures, combinaisons...

Figure n° 23 : LE PROJET OLYMPIA DE SYLVE TRUYMAN



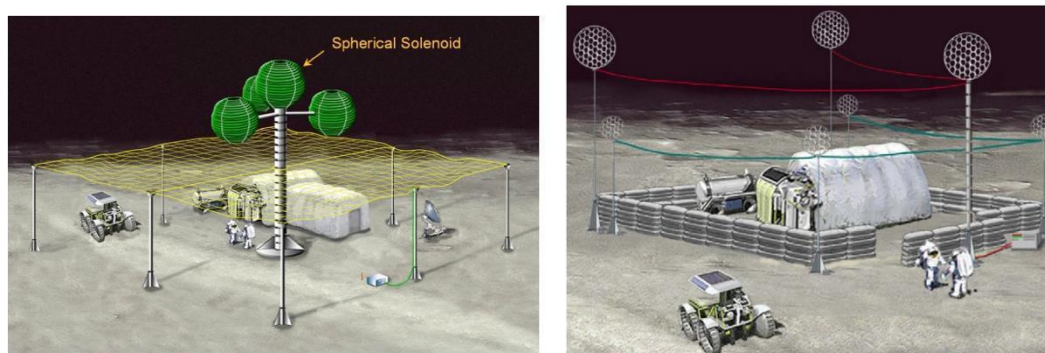
Ici, c'est le relief qui protège en partie les occupants des radiations.

Les moyens de protection d'une base extraterrestre pourraient être les suivants :

- ➔ Eau (la littérature montre qu'un « bouclier d'eau » de 15 cm d'épaisseur réduirait sensiblement les risques) ;
- ➔ Régolithe compressé (la R&D montre que quelques dizaines de centimètres d'épaisseur seraient suffisants pour assurer une protection solide sans écraser les structures pressurisées). Il faut cependant se méfier de certaines technologies qui apparaissent comme miraculeuses : aujourd'hui pour l'impression 3D, on utilise plus de colle que de matière prise sur place ;
- ➔ Matériaux de synthèse adéquats dans la mesure du possible (les plastiques sont à privilégier) ;
- ➔ Gilet protecteur (pour assurer des activités critiques en cas d'éruption solaire)²⁷ ;
- ➔ Importance de la ventilation (problème du radon, gaz radioactif).

En plus de ces moyens passifs, il existe aussi des projets américains²⁸ pour créer une enveloppe de protection active à base de systèmes électrostatiques²⁹.

**Figure n° 24 : PROJET DE PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS
PAR SYSTÈME ÉLECTROSTATIQUE**



5. Questions posées pour des séjours prolongés sur Mars

► Quelles seraient les conditions d'exposition ?

Le mode de vie est déterminant pour définir les conditions d'exposition : temps passé dans l'habitat, à l'extérieur, profil de la communauté (h/f, reproduction)... ;

L'habitat devra prendre en compte la protection contre les radiations et possiblement le radon.

Pour quelles activités à l'extérieur, avec quels équipements et quelle organisation ?

²⁷ La société israélo-américaine StemRad a mis au point la ceinture 360 Gamma pour protéger la moelle osseuse du bassin de l'utilisateur contre les radiations. Un partenariat a été signé en 2015 avec Lockheed Martin pour adapter cet équipement pour les futurs équipages du vaisseau Orion.

²⁸ Charles Buhler, « Analysis of a Lunar base electrostatic radiation shield concept », NIAC CR 04-01, NIAC, Nasa.

²⁹ Tariq Malik, « Lunar shields: radiation protection for Moon-based astronauts », sur le site Space.com, janvier 2021.

▶ La spécificité du schéma de rayonnement à la surface de Mars aura-t-elle un effet ?

La nature (*composition, énergie...*) des radiations martiennes peut-elle jouer sur l'apparition de pathologies radioinduites ?

Quel sera l'effet des blindages additionnels (*bâtiments, abris en sous-sol...*) ?

▶ Validité des modèles de risque ?

Radioprotection principalement basée sur le risque de survenue de cancer à long terme (*effets « stochastiques »*) ;

Nécessité de mieux prendre en compte les effets non cancéreux qui pourraient survenir à moyen terme dans la gamme de dose en jeu ;

Possibilité d'effets synergiques (sur l'effet des radiations) liés au fait d'être soumis à différents stress physiologiques ;

Prise en compte de la radiosensibilité (*génétique, h/f, enfants...*) et de la susceptibilité.

▶ Quelles sont les pathologies qui pourraient être rencontrées ?

Une exposition continue relativement élevée peut conduire à des pathologies non cancéreuses à moyen terme (*cardiovasculaires, cataracte, si exposition *in utero* : retards mentaux, malformations congénitales...*) qui nécessiteraient des prises en charge spécifiques ;

En cas d'éruption majeure, en l'absence de protection additionnelle adaptée, les doses reçues pourraient être très élevées et conduire à des pathologies déjà rencontrées sur Terre en cas d'accident radiologique (*atteinte du système hématopoïétique...*).

6. Recommandations pour la gestion des radiations

- ▶ En fonction des scénarios d'exposition, les effets des radiations seront à réévaluer avec des modèles de risque adaptés ;
- ▶ Valider la méthode des facultés individuelles de radiosusceptibilité pour la sélection des astronautes ;
- ▶ Rechercher les moyens d'assurer une protection adéquate contre les radiations ;
- ▶ Rechercher des médicaments pour traiter et/ou prévenir les effets délétères des radiations.

▶ **Études à conduire**

▶ Scénarios d'exposition

Définir des scénarios d'exposition (*médian, enveloppe, éruption du siècle...*) prenant en compte le mode de vie et les protections radiologiques ;

Travailler sur le profil de la communauté : *âge, sexe, reproduction sur place ou non* ;

Mener des études cellulaires sur l'impact des radiations, notamment à l'aide de ballons stratosphériques.

▶ Modèles de risque

Améliorer/revisiter les modèles de risque (*approche « Adverse Outcome Pathway, AOP »...*) en prenant en compte les différentes pathologies humaines radio-induites et la spécificité du champ de rayonnement (*nature, énergie...*) ;

Simuler une exposition continue à des doses modérées à fortes : *expérimentation animale, effets combinatoires/cumulés.*

▶ Pathologies attendues

Identifier les pathologies attendues en fonction des scénarios d'exposition afin de les étudier de façon plus ciblée ;

Étudier l'impact de la spécificité de l'environnement radiatif martien sur les pathologies et des cofacteurs (*pesanteur...*) ;

Étudier l'effet de stress combinés : *radiation + stress + type alimentation (microbiote)...*

Étudier les effets des radiations sur les plantes comestibles à l'aide de simulateurs.

▶ Prise en charge des pathologies

Définir les modalités de leur prise en charge sur site ;

Définir leur impact sur l'organisation de la vie (*cataracte...*) ;

Préciser les modalités d'administration des contremesures médicales en cas d'exposition à forte dose ;

Sélectionner les « martiens » : *âge, sexe, séquençage du génome pour déterminer les prédispositions à réparer ou à développer des pathologies, donneur/receveur de greffe histocompatible (en cas d'aplasie radio-induite)...*

▶ Protection radiologique

Étudier les blindages qui pourraient être utilisés et leur efficacité (*matériaux composites...*) ;

Étudier l'effet des blindages sur l'atténuation des radiations et la nature du rayonnement résiduel (*composition, énergie...*) ;

Prendre en compte l'exposition au radon dans la conception des habitats.

Psychologie spatiale

1. Sélection des astronautes

En plus de l'importance du monitoring médical permanent de l'équipage, l'aspect psychologique de cette aventure devra être anticipé et suivi tout au long de la mission, demeurant ainsi une priorité du processus de sélection des candidats. Celui-ci pourra être optimisé à l'aide de la « psychologie positive », qui permet d'étudier expérimentalement et en amont, les individus et les organisations. Le principe d'évaluation psychologique permettrait de déterminer les profils qu'on ne souhaite pas avoir, plutôt que ceux que l'on pourrait avoir.

Ainsi, la sélection des astronautes d'une mission extraterrestre longue durée nécessite l'élaboration d'une liste de critères psychologiques spécifiques. Tout d'abord, un voyage de ce type nécessitera le recrutement d'hommes et de femmes tolérants à la frustration, concentrés sur les tâches, et surtout capables de résister au stress. Les stages de commando militaires permettent la mise en condition de façon médicalement acceptable des sujets, où il est possible d'étudier la capacité d'un individu à maîtriser une situation de crise.

Une grande adaptabilité sera exigée des candidats individuellement, tout en veillant à la compatibilité globale de l'équipage. En effet, les travaux réalisés en psychologie des groupes soulignent l'importance pour l'équipage de désigner/se voir désigner un médiateur, mais aussi une certaine hiérarchie des chefs afin de garantir l'équilibre entre les individus.³⁰ Idéalement, toutes les langues pratiquées par les astronautes devraient être connues des autres pour faciliter l'entente et le maintien du lien social, sans oublier la tolérance culturelle obligatoire pour tous les occupants de cette future base extraterrestre.

Il faut bien sûr prendre en compte qu'une certaine adaptation est nécessaire, car le voyage spatial entraîne un dérèglement des cycles circadiens (rythme biologique humain) et peut également conduire à une augmentation du stress, du niveau de fatigue, ainsi qu'une baisse de performance globale. À l'heure actuelle, l'impact potentiel d'une exposition à 1/6^{ème} de G sur le sommeil humain, y compris sa qualité, n'est pas connu. On constate également une grande différence entre Mars, qui possède un cycle jour-nuit très semblable à celui de la Terre, et la Lune où ce cycle est de 14 jours.

³⁰ En termes de structure, les expériences d'entraînement de l'armée mettent également en exergue l'efficacité du travail en binôme. (Pierre Schill, « Les dimensions collectives du moral », *Inflexions*, vol. 6, n° 2, 2007, pp. 61-75.)

**Figure n° 25 : ASTRONAUTE DE L'ÉQUIPAGE DE MARS500
EN PHASE DE SOMMEIL PROFOND³¹**



Il faut également s'interroger sur les intérêts des astronautes à entreprendre le voyage, qui peuvent être motivés par divers sentiments (volonté d'aventure, attachement patriotique, sens de la mission, etc.). L'implantation d'une base humaine sur Mars constitue une avancée considérable à l'échelle de l'histoire de l'humanité. Ainsi, les candidats doivent rester concentrés sur leurs motivations profondes qui leur permettront de rester stables psychologiquement. De plus, les hommes et femmes participant à cette mission de longue durée doivent être prêts à se détacher de leurs proches ainsi que de leur environnement, au profit d'une expérience unique au monde. La motivation des candidats demeure un élément primordial dans le processus de sélection, puisqu'elle déterminera en partie le bon déroulé de la mission au niveau de l'endurance psychologique.

La composition homme/femme de l'équipage a également un impact psychologique considérable sur les occupants du vaisseau. L'astronaute Jean-Jacques Favier rapporte que lors de son vol spatial, la présence d'une femme à bord a permis de stabiliser certaines situations, soulignant ainsi l'importance d'un équipage mixte. La présence des femmes dans un équipage serait bénéfique en particulier pour diminuer le stress. Gloria Leon, professeure émérite et membre du National Academy of Science (NAS) *Decadal Survey on Biological and Physical Sciences in Space, Human Behavior and Mental Health panel*, évoque également cet aspect. D'après elle, un équipage mixte induit une diversité de personnalités compatibles, et évite le développement d'une compétition entre « mâles Alpha », ce qui fut notamment observé dans l'environnement analogue de l'Antarctique avec deux hommes britanniques³².

Considérer la problématique des relations entre les membres de l'équipage impose de prendre en compte la dimension culturelle : les États-Unis ont généralisé les équipages mixtes avec l'exploitation de la navette spatiale, mais sans parité sur le nombre d'hommes et de femmes embarqués. En revanche, seules trois femmes russes ont accompli des missions spatiales depuis 1963. Lors de la mission expérimentale russe de Mars500, l'équipage était ainsi entièrement composé d'hommes. Dans la perspective de l'implantation d'une base martienne, il faut également prévoir que les relations entre les hommes et les femmes se modifient progressivement.

³¹ Site officiel de la mission Mars500. http://mars500.imbp.ru/en/gallery/520_inside_3.html, consulté le 25 janvier 2021.

³² <https://www.space.com/mixed-gender-astronaut-crew-mars-exploration.html>

Figure n° 26 : ÉQUIPAGE INTERNATIONAL DE LA MISSION EXPÉRIMENTALE DE MARS500³³



Il serait également intéressant d'étudier en quoi la génération actuelle est différente des générations précédentes. Les changements d'habitude de vie, liés à l'évolution de la société (apparition de l'écran comme pourvoyeur de plaisir, surveillance globale, etc.) ainsi qu'à la pandémie de Covid-19 (confinement), pourraient donner des indications précieuses sur l'évolution du profil des futurs astronautes.

2. Épreuves psychologiques dans l'espace

2.1. Le confinement et l'isolement

Confinement, isolement, séparation de l'entourage (famille, amis, connaissances), les environnements extrêmes ou inhabituels posent des problèmes à ceux qui n'y sont pas habitués. Cependant, il y aura vraisemblablement une différence entre le confinement de la crise sanitaire et celui consenti pour la vie (ou la survie) dans une base extraterrestre. Dans le cadre d'une installation martienne longue durée, il faut acclimater les individus au confinement. Par exemple, lors de la mission expérimentale Mars500, l'équipage a pris part à un confinement progressif, de 14 jours, puis de 105 jours, pour terminer avec 520 jours d'isolement complet. Il y aura également un trajet qui est aussi un confinement, et il semble impératif de constituer certaines règles de comportement.

La capacité à supporter des périodes prolongées d'isolement dépend de la personnalité, du vécu, de la formation et de l'entraînement. Cette capacité fait écho à notre rapport à la liberté. Un être humain n'est pas nécessairement victime du confinement lorsqu'il n'a jamais eu de liberté, mais les humains ayant vécu sur Terre ont quasiment tous vécu dans un environnement moins confiné qu'un vaisseau spatial.

³³ Site officiel de la mission Mars500. Consulté le 20 janvier 2021 – http://mars500.imbp.ru/en/gallery/520_inside_3.html

Le confinement a tendance à exacerber certains traits de personnalité qui ne posent pas de problème en temps normal. En effet, les astronautes à bord n'ont pas réellement d'exutoire que ce soit pendant le voyage ou sur place, ce qui diminuerait la rationalité du groupe dans son ensemble. La psychologue clinicienne Marie-Estelle Dupont souligne à ce propos l'importance des repères psychiques, temporels et spatiaux lors des périodes prolongées de confinement, et la nécessité de délimiter les différentes salles du vaisseau spatial afin de laisser à chacun un espace personnel. Quant aux repères temporels, il est également bienvenu de créer une routine fixe alternant recherche, entraînement physique, temps personnel, temps en groupe, repas...³⁴

Figure n° 27 : L'ASPECT VISUEL DE L'AMÉNAGEMENT D'UN HABITAT SPATIAL SEMBLE IMPORTANT POUR LES ASTRONAUTES



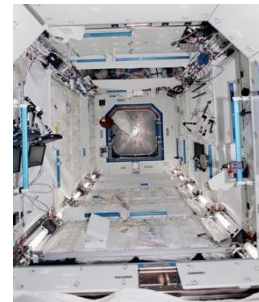
Skylab



Mir



ISS



Tiangong

Dans ce contexte, la nourriture n'a pas seulement un rôle physiologique mais également une fonction psychologique. L'astronaute vit dans un environnement contraint et son épanouissement dépend de sa marge de manœuvre. Mais alors que la nourriture peut apporter une forme de liberté, les contraintes de logistique et de production, ainsi que les possibilités limitées de cuisiner font qu'il ne peut pas utiliser pleinement la nourriture comme un plaisir lui permettant de s'évader. Le rapport à la nourriture peut être influencé par des facteurs socio-culturels : ainsi dans les sous-marins américains on ne constate pas de problème lié au *snacking*, alors qu'on constate une grande lassitude chez les militaires français au bout de trois mois de ration peu variées. La nourriture est donc un thème transverse qui passe par toute la pyramide de Maslow et va de la survie jusqu'à l'épanouissement personnel. Elle a un fort impact psychologique.

Il est également à noter que l'ennui peut se manifester facilement lors d'une mission de longue durée. Il est donc nécessaire que l'activité des astronautes soit soutenue. Quel que soit le groupe, dès lors qu'un besoin fondamental n'est pas satisfait pour un membre du groupe, l'ensemble de l'équipage se trouve confronté à des difficultés conséquentes. Si la réalité virtuelle permet de combler ce besoin, peut-être cela serait-il à envisager. Par exemple, pendant la simulation Mars500, c'est la gestion du temps libre qui était compliquée. Dans ce cas, l'équipage avait brisé la monotonie en célébrant de nombreux événements (fêtes, anniversaires, commémoration). D'aucuns estiment que « la force de l'équipage, c'est de contrer la lassitude ».

³⁴ Site web de Marie-Estelle Dupont – <https://www.marieestelledupont.com/les-articles/confinement-quels-risques>, consulté le 25 janvier 2021.

Figure n° 28 : L'ÉQUIPAGE DE MARS500 CÉLÉBRANT LA FÊTE D'HALLOWEEN³⁵

De même, le fait de voir la Terre semble être important d'un point de vue psychologique, même s'il existe peu de données sur le sujet car aucun humain ne s'est éloigné suffisamment de la Terre pour étudier le phénomène. Le voyage spatial sur Mars, en raison de l'éloignement et de la durée qu'il nécessite, comporte ainsi de nombreuses inconnues d'un point de vue psychologique.

2.2. L'absence de communication

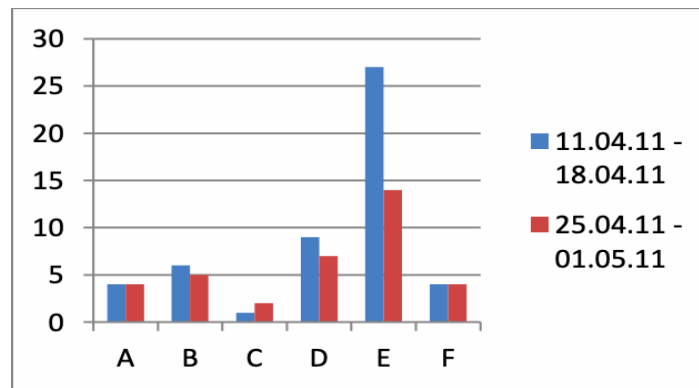
Les astronautes seront également confrontés à un manque drastique de communication qui va de pair avec les notions de confinement et d'isolement, en particulier lors de missions martiennes. Il faudra faire particulièrement attention aux effets potentiels que peuvent engendrer une absence de récompense, la monotonie et le manque de stimulation affective. Un travail est également à prévoir sur la notion d'intimité.

Les échanges avec un cercle de proches, quand ils sont possibles, ont un caractère très rassurant, mais lors des missions futures il faudra que les astronautes soient capables de se passer complètement des échanges en temps réel, rendus impossibles notamment par l'éloignement de Mars, éloignement ne permettant pas les communications en temps réel. Certaines expériences passées pourraient s'avérer riches d'enseignement. Il y a notamment eu une crise dans Mars500 lorsque les cinq membres d'équipage ont appris que leur collègue chinois avait eu le droit de parler à sa famille sans attendre 20 minutes pour se connecter, ou sans qu'il y ait 20 minutes d'attente entre le message de l'astronaute et le message en réponse. Cette expérience unique a également permis de mettre en exergue certaines variations de comportements en fonction de l'accès, ou non, aux moyens de communications. Une des crises mises en place durant l'expérience était la coupure totale de toute forme de communication possible avec « *Mission Control* » pendant une semaine. Le tableau ci-dessous présente le nombre de messages envoyés avant (bleu) et après la coupure de communication (rouge)³⁶.

³⁵ Site officiel de la mission Mars500. http://mars500.imbp.ru/en/gallery/520_inside_halloween.html, consulté le 25 janvier 2021.

³⁶ V. Gushin et al., « Crew-MC interaction during communication delay in mars-500 », *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, 2012.

Figure n° 29 : NOMBRE DE MESSAGES ENVOYÉS PAR SIX MEMBRES D'ÉQUIPAGE DE MARS500 AVANT ET APRÈS LA PÉRIODE DE PERTE DE COMMUNICATION



Les différences étaient notables à l'échelle de l'individu (E), mais en moyenne, l'événement semble avoir eu un impact assez réduit sur les habitudes de l'équipage.

Enfin, il serait nécessaire de maintenir le lien avec les psychologues sur Terre. Ces derniers pourraient aider à détecter les problèmes psychologiques d'un astronaute.

3. Les environnements analogues ou comparables à la vie dans l'espace

Il est possible d'étudier sur Terre des environnements analogues qui permettent de recréer en partie les conditions de la vie spatiale.

3.1. Les bases en antarctique

Figure n° 30 : LA BASE CONCORDIA EN ANTARCTIQUE



Les bases en Antarctique telles que Concordia simulent bien le séjour des astronautes sur une planète. Durant l'hiver, les bases sont encore plus isolées que la station spatiale internationale : il n'existe que de très rares solutions de rapatriement et les opportunités de communication sont limitées à quelques heures par jour. Les sorties se préparent aussi bien qu'une EVA, avec chaufferettes, batteries de secours, destination : c'est un protocole assez complet.

Les bases antarctiques permettent aussi de comprendre comment se conçoit une base en environnement hostile. Jusqu'ici pour les missions spatiales, seuls des profils très spécialisés et de très haut niveau de qualification étaient sélectionnés. Le modèle Antarctique prend en compte différents profils sociaux, comme il est vraisemblable qu'il faudrait le faire pour une base spatiale.

Cependant, il existe un besoin de diffusion plus large des données provenant de ces environnements. En effet, très peu de données sont disponibles à l'heure actuelle sur les sous-marins ou même Concordia.

3.2. Les sous-marins nucléaires

Figure n° 31 : SCHEMA
D'UN SOUS-MARIN
NUCLÉAIRE LANCEUR
D'ENGIN FRANÇAIS



L'exemple du sous-marin nucléaire permet de s'intéresser plus précisément aux capacités développées par les hommes et les femmes y ayant vécu. En effet, les sous-marinières sont sélectionnés en fonction de certaines prédispositions psychologiques et ont développé des capacités singulières pour supporter pendant des semaines ou des mois le confinement. Parmi les qualités attribuées aux sous-marinières figurent entre autres : une vie intérieure intense, un esprit d'entraide très développé et la pratique de la pleine conscience (développement personnel, méditation, etc.).

En effet, la pleine conscience permet de développer une meilleure capacité d'attention aux différents stimuli dans l'environnement du sous-marin. Cela induit ainsi une meilleure capacité d'attention, puisque l'environnement du sous-marin permet d'être sensible à plusieurs stimuli. L'usage psychothérapeutique de la « pleine conscience » peut se définir comme étant la centralisation de « *toute son attention sur l'expérience présente, moment après moment* » (Marlatt & Kristeller, 1999). Ainsi, c'est une forme d'acceptation de ses sensations physiques et de ses émotions, sans jamais éprouver de jugement envers celles-ci³⁷. C'est une forme de méditation bouddhiste souvent utilisée dans la régularisation émotionnelle, le développement de la conscience corporelle, la tolérance à la douleur, mais aussi le développement d'une certaine flexibilité attentionnelle. Dans le cadre d'un isolement prolongé dans un sous-marin ou sur Mars, faire usage de la « pleine conscience » permettrait notamment à l'équipage de

³⁷ Bondolfi Guido, Françoise Jermann et Ariane Zermatten, « Les approches psychothérapeutiques basées sur la pleine conscience (*mindfulness*). Entre vogue médiatique et applications cliniques fondées sur des preuves », *Psychothérapies*, vol. 31, n° 3, 2011, pp. 167-174.

stabiliser leurs émotions et favoriserait leur ancrage corporel et mental dans l'instant présent, diminuant ainsi les risques de dépression.

Figure n° 32 : MÉDITATION EN PLEINE CONSCIENCE DES ASTRONAUTES LORS D'UNE MISSION ANALOGUE DE SIMULATION MARTIENNE³⁸



De plus, des études cherchant à explorer les relations entre environnement et individualité ont permis de constater que, étonnamment, il y avait peu de différences entre les sous-marinières. En effet, les individus qui composent ces équipages possèdent des qualités très similaires telles qu'une extraversion et une agréabilité faibles (vie en autonomie), une ouverture au monde, à l'esthétisme et à la découverte, tout en étant très peu nerveux. D'autre part, les sous-marinières les plus expérimentées sont des gens du matin, alors que les gens du soir ont une vision différente.

3.3. Les villages militaires d'opérations extérieures

Un village en OPEX, par certaines de ces caractéristiques, ressemble également fortement à ce que pourrait être une base spatiale du point de vue de l'isolement. La conception des hôpitaux de campagne permettrait notamment de lister la plupart des fonctions médicales absolument nécessaires pour une base spatiale³⁹. Si une colonie n'est pas autonome par rapport à ces besoins essentiels, sa survie à long terme sera mise en danger. Un travail de recherche mené avec des militaires pourrait révéler des solutions à des problèmes communs aux situations militaire et spatiale.

³⁸ Staats, Jeweel. Slides from SharpBrains Virtual Summit, October 28-30th, 2014.

³⁹ Cependant les hôpitaux de campagne ne disposent pas nécessairement de la panoplie complète des soins médicaux, et la pratique d'évacuations sanitaires ou de rapatriement sanitaire demeure possible.

Figure n° 33 : UN VILLAGE D'OPÉRATIONS EXTÉRIEURES EN AFGHANISTAN



4. Recommandations pour la psychologie dans l'espace

- ▶ Étudier l'usage de la « psychologie positive » pour évaluer les individus et les équipages en amont du vol.
- ▶ Évaluer les motivations profondes des candidats pour déterminer si ces motivations pourront leur permettre de résister aux périodes de stress et d'ennui engendrées par une mission spatiale de longue durée.
- ▶ Assurer un équipage mixte sinon paritaire, la présence de membres des deux sexes permettant de stabiliser les relations sociales du groupe.
- ▶ Surveiller en permanence l'état psychologique des astronautes tout au long de leur mission.
- ▶ Créer une « culture du confinement » au sein de l'équipage, par l'usage de méditations en pleine conscience, de technologies de réalité virtuelle ou d'autres types de « contre-mesure psychologique ». Travailler sur les notions d'intimité, d'absence de communication, etc.
- ▶ Étudier l'importance de la nourriture dans la psychologie des astronautes en fonction de leur personnalité mais aussi de leur culture.
- ▶ Obtenir un retour d'expérience sur les confinements en France et dans le monde, et étudier si cette expérience permettrait de tirer des leçons, en particulier sur l'architecture adaptée de bâtiments.
- ▶ Participation à l'ANR Covid, pour s'intéresser aux thèmes de l'Éthique et des dynamiques sociales ainsi qu'au thème des Enjeux globaux de la pandémie, qui pourraient servir à alimenter la recherche en psychothérapie des astronautes.

- ▶ Travailler sur les méthodes permettant de vaincre la monotonie engendrée par la vie sur d'autres planètes. La méditation en pleine conscience ou la réalité virtuelle pourraient être des solutions à envisager.
- ▶ Améliorer le confort physique et visuel des occupants d'une base extraterrestre, par une conception sur Terre ou par des créations des astronautes eux-mêmes.
- ▶ Diffuser les informations en provenance d'environnements analogues tels que Concordia en Antarctique ou dans les sous-marins nucléaires lanceurs d'engin.

Recommandations

1. Systèmes de support-vie

- ▶ Intensifier la recherche sur les systèmes de support-vie en boucle fermée et analyser l'intérêt d'un système en boucle fermée par rapport à un système en boucle semi-ouverte (en particulier vis-à-vis de l'utilisation de ressources sur place).
- ▶ Recherche des techniques de purification/distillation et re-minéralisation de l'eau extraterrestre.
- ▶ Réévaluer les besoins en nourriture, en eau et en air nécessaires par personne et par jour dans la perspective d'une installation pérenne.
- ▶ Étudier l'adéquation des ressources exploitables sur Mars avec les besoins physiologiques des plantes.
- ▶ Simuler la production de plantes dans les conditions d'exploitation permises en environnement lunaire ou martien.
- ▶ Simuler la croissance des plantes sur différents sols extraterrestres.
- ▶ Étudier l'apport des lichens pour l'agriculture à la surface de Mars.
- ▶ Approfondir les usages des plantes pour une colonie spatiale (agriculture nutritive, dépollution, confort psychologique, ressources thérapeutiques, etc.).
- ▶ Définir la méthode de culture la plus adaptée pour l'exploitation agricole sur d'autres corps célestes.
- ▶ Étudier l'intérêt des technologies d'alimentation de synthèse pour les bases extraterrestres : viande *in vitro*, agriculture acellulaire, impression 3D alimentaire.
- ▶ Évaluer l'usage des plantes pour la construction des habitats (habitat « techno » vs habitat « vivant » et biomimétisme).
- ▶ Étudier les matériaux issus du vivant pour les applications spatiales.
- ▶ Étudier le recyclage extrême autour de la notion de « verre d'eau pour une douche ».
- ▶ Créer une base de données et d'études permettant un inventaire et un panorama de l'existant en matière de connaissances et d'expérimentations sur les support-vie.

2. Médecine spatiale

- ▶ Le groupe recommande d'intensifier les expériences sur les animaux, avec notamment les biosatellites russes qui permettent des études à une altitude de 1 000 km.
- ▶ Développer des méthodes non invasives de surveillance permanente de la santé physique des astronautes, par exemple à partir de capteurs biologiques tels que des patches électroniques.
- ▶ Miniaturiser les équipements d'exploration tels que les scanners et les IRM pour un emport dans l'espace.
- ▶ Développer des protocoles de sélection incluant une mesure de la radio-susceptibilité des candidats.
- ▶ Étudier les techniques de traitement et chirurgie à distance applicables aux autres corps célestes, notamment à partir de solutions de réalité virtuelle.
- ▶ Étudier des interventions chirurgicales non invasives, des techniques d'exploration du corps miniaturisées ainsi que le potentiel de réparation du corps humain à partir de cellules souches.
- ▶ Intégrer à des environnements analogues tels que les sous-marins et les bases antarctiques des études physiologiques de type *bedrest* et également de confinement pour simuler une expédition de longue durée.
- ▶ Développer les techniques de traitement d'affections dentaires dans l'espace, notamment l'impression 3D de couronnes et de plombages.
- ▶ Concevoir l'architecture des bases autour de la possibilité de diffusion d'un agent pathogène.
- ▶ Mettre en place des procédures strictes à suivre en cas de décès.
- ▶ Compléter la pharmacopée par des plantes médicinales cultivées sur d'autres corps célestes.
- ▶ Intensifier la R&D sur des technologies et des usages de rupture (physique quantique, microbiotes, microchirurgie, etc.).

3. Radiations

- ▶ En fonction des scénarios d'exposition, les effets des radiations seront à réévaluer avec des modèles de risque adaptés.
- ▶ Valider la méthode des facultés individuelles de radio-susceptibilité pour la sélection des astronautes.

- ▶ Rechercher les moyens d'assurer une protection adéquate contre les radiations.
- ▶ Rechercher des médicaments pour traiter et/ou prévenir les effets délétères des radiations.
- ▶ Conduire des études sur :
 - Les scénarios d'exposition ;
 - Les modèles de risque ;
 - Les pathologies attendues ;
 - La gestion des pathologies ;
 - La protection radiologique.

4. Psychologie spatiale

- ▶ Étudier l'usage de la « psychologie positive » pour évaluer les individus et les équipages en amont du vol.
- ▶ Évaluer les motivations profondes des candidats pour déterminer si ces motivations pourront leur permettre de résister aux périodes de stress et d'ennui engendrées par une mission spatiale de longue durée.
- ▶ Assurer un équipage mixte sinon paritaire, la présence de membres des deux sexes permettant de stabiliser les relations sociales du groupe.
- ▶ Surveiller en permanence l'état psychologique des astronautes tout au long de leur mission.
- ▶ Créer une « culture du confinement » au sein de l'équipage, par l'usage de méditations en pleine conscience, de technologies de réalité virtuelles ou d'autres types de « contremesure psychologique ». Travailler sur les notions d'intimité, d'absence de communication, etc.
- ▶ Étudier l'importance de la nourriture dans la psychologie des astronautes en fonction de leur personnalité mais aussi de leur culture.
- ▶ Obtenir un retour d'expérience sur les confinements en France et dans le monde, et étudier si cette expérience permettrait de tirer des leçons, en particulier sur l'architecture adaptée de bâtiments.
- ▶ Participation à l'ANR Covid, pour s'intéresser aux thèmes de l'Éthique et des dynamiques sociales ainsi qu'au thème des Enjeux globaux de la pandémie, qui pourraient servir à alimenter la recherche en psychothérapie des astronautes.
- ▶ Travailler sur les méthodes permettant de vaincre la monotonie engendrée par la vie sur d'autres planètes. La méditation en pleine conscience ou la réalité virtuelle pourraient être des solutions à envisager.

- ▶ Améliorer le confort physique et visuel des occupants d'une base extraterrestre, par une conception sur Terre ou par des créations des astronautes eux-mêmes.
- ▶ Diffuser les informations en provenance d'environnements analogues tels que Concordia en Antarctique ou dans les sous-marins nucléaires lanceurs d'engin.

Conclusion

Les trois réunions plénières du groupe « Soutien à la Vie dans l'Espace » ont permis de faire émerger des problématiques diverses auxquelles seront confrontés les astronautes qui vivront dans les futures bases spatiales pérennes. Ces problèmes ont été abordés selon différents angles par les participants du groupe, qui n'ont pas tous une expérience du domaine spatial mais disposent d'une expertise dans des domaines pertinents pour celui-ci (radiations, psychologie, agriculture, etc.). La complémentarité des expertises sollicitées a permis d'aboutir à la liste de recommandations disponible ci-dessus, qui constitue seulement un condensé du savoir partagé par ce groupe de volontaires. **La richesse de l'expérience Space'ibles a poussé les membres du groupe à proposer une recommandation plus générale : la création d'une base de données d'études et de travaux qui constituerait un inventaire virtuel de tout ce qui existe et concerne la vie dans l'espace.** Celle-ci pourrait contenir des informations sur les ressources exploitables, les besoins et problèmes physiologiques des plantes, etc. Les connaissances directement applicables au soutien à la vie dans l'espace sont bien sûr disponibles sur les sites des agences spatiales, mais de nombreuses organisations dans des domaines autres que le spatial travaillent également sur des sujets pertinents. L'ouverture de la communauté spatiale à d'autres disciplines, qui est un des objectifs de Space'ibles, pourrait avoir la vertu de fournir des informations à la communauté spatiale, mais également d'ouvrir ces autres communautés aux enjeux universels portés par l'espace et donner la possibilité de trouver conjointement des solutions innovantes à des problèmes similaires.