



HAL
open science

Odontologie au cours des missions spatiales habitées : revue narrative

Timothée Bourgeois

► **To cite this version:**

Timothée Bourgeois. Odontologie au cours des missions spatiales habitées : revue narrative. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-02337636

HAL Id: dumas-02337636

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02337636v1>

Submitted on 29 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT - PARIS 7

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

5, Rue Garancière 75006 PARIS

Année 2017

Thèse N° : 5162

N° attribué par la bibliothèque : 2017PA07G069

THÈSE pour le DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR

en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le 07 décembre 2017

par **BOURGEOIS** *Timothée*

**ODONTOLOGIE AU COURS DES MISSIONS SPATIALES
HABITÉES : REVUE NARRATIVE**

Directrice de thèse : Docteur Catherine Mesgouez

Co-Directrice de thèse : Docteur Brigitte Godard

JURY

M. le Professeur P. BOUCHARD

Président

M. le Docteur C. AZEVEDO

Assesseur

Mme le Docteur M.H. COTTET

Assesseur

Mme le Docteur C. MESGOUEZ

Assesseur

M. le Docteur E. SOFFER

Assesseur

Mme le Docteur B. GODARD

Membre invitée

M. le Docteur B. COMET

Membre invité

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT - PARIS 7

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

5, Rue Garancière 75006 PARIS

Année 2017

Thèse N° :

N° attribué par la bibliothèque :

THÈSE pour le DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR

en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le 07 décembre 2017

par **BOURGEOIS** *Timothée*

né le 06 juin 1990

**ODONTOLOGIE AU COURS DES MISSIONS SPATIALES
HABITÉES : REVUE NARRATIVE**

Directrice de thèse : Docteur Catherine Mesgouez

Co-Directrice de thèse : Docteur Brigitte Godard

JURY

M. le Professeur P. BOUCHARD

Président

M. le Docteur C. AZEVEDO

Assesseur

Mme le Docteur M.H. COTTET

Assesseur

Mme le Docteur C. MESGOUEZ

Assesseur

M. le Docteur E. SOFFER

Assesseur

Mme le Docteur B. GODARD

Membre invitée

M. le Docteur B. COMET

Membre invité

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT – PARIS 7

Présidente de l'Université : Mme la Professeure Christine CLERICI

Doyenne de l'U.F.R. d'Odontologie : Mme la Professeure Ariane BERDAL

Directrice Générale des Services : Madame Pascale SAINT-CYR

JURY

M. le Professeur P. BOUCHARD	Président
M. le Docteur C. AZEVEDO	Assesseur
Mme le Docteur M.H. COTTET	Assesseur
Mme le Docteur C. MESGOUEZ	Assesseur
M. le Docteur E. SOFFER	Assesseur
Mme le Docteur B. GODARD	Membre invitée
M. le Docteur B. COMET	Membre invité

M. le Professeur Philippe BOUCHARD Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Professeur des Universités - Praticien
Hospitalier

Vous me faites l'honneur de présider ma thèse. Je vous remercie pour l'intérêt que vous portez à ce travail. Vous avez réussi à me transmettre votre passion pour la Parodontologie. Recevez ici toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

M. le Docteur Christophe AZEVEDO Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Vous me faites l'honneur de votre présence au jury de ma thèse. Merci pour votre enseignement des TP de Morphologie Dentaire aux cours en amphithéâtre. Je vous prie de recevoir toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

Mme le Docteur Marie-Hélène COTTET Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Votre présence au sein de ce jury m'honore. Merci pour votre patience et votre gentillesse tant en cours magistraux qu'à l'hôpital Rothschild pour l'accompagnement de mes patients. Veuillez recevoir toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

Mme le Docteur Catherine MESGOUEZ Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Je vous remercie du fond du cœur pour avoir accepté de prendre la direction de ma thèse et pour l'intérêt que vous avez porté à mon sujet. Votre patience et votre implication m'ont été d'un grand renfort tout au long de mon travail. Vos nombreux conseils m'ont permis de voir ce travail aboutir. Merci également pour votre accompagnement durant toute la durée de mes études à la faculté comme en clinique et pour la qualité de vos cours. Recevez ici toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

M. le Docteur Emmanuel SOFFER

Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Vous m'honorez de votre présence au sein de ce jury. Merci pour la transmission de votre passion pour la Prothèse Dentaire et pour la patience que vous avez montré lors de vos enseignements. Je vous prie de recevoir toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect

Mme le Docteur Brigitte GODARD

Docteur en Médecine
Diplôme de Doctorat
Médecin des astronautes européens

Vous me faites l'honneur de co-diriger ma thèse et de votre présence dans ce jury. Je vous remercie pour la gentillesse de votre accueil et pour le temps que vous m'avez consacré à répondre à toutes mes questions. Merci pour votre passion pour la médecine spatiale et pour la relecture de mon travail. Recevez toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

M. le Docteur Bernard COMET

Docteur en Médecine
Diplôme de Doctorat
Ancien médecin des astronautes européens
Président du « Medical Board » de l'agence spatiale européenne

Votre gentillesse et votre disponibilité lors de notre rencontre à Toulouse resteront un souvenir impérissable. Merci pour avoir répondu positivement à l'invitation à intégrer le jury de ma thèse et pour le temps passé à relire et corriger mon travail. Vous m'avez fait l'honneur de partager vos expériences et votre passion pour la médecine spatiale. Veuillez recevoir toute ma reconnaissance et l'expression de mon plus profond respect.

Sommaire

Introduction	3
1. Histoire de la conquête spatiale	4
1.1 Historique	4
1.1.1 Un désir ardent d'aventure.....	4
1.1.2 L'appel du cosmos.....	4
1.1.3 L'ère des stations spatiales	6
1.2 Contexte actuel	7
1.2.1 L'après Guerre Froide.....	7
1.2.2 Changement d'organisation des agences spatiales.....	7
1.2.3 Un nouveau contexte géopolitique.....	8
2. Les vols spatiaux habités	10
2.1 Contraintes	10
2.1.1 Contraintes physiologiques.....	10
2.1.2 Contraintes psychologiques	16
2.2 Sélection des astronautes	19
2.2.1 Recrutement (Source : ESA.int)	19
2.2.2 Formation (ESA 2015, ESA.int).....	22
2.3.1 Alimentation	24
2.3.2 Hygiène et prévention.....	29
3. Odontologie et vols spatiaux	32
3.1 Pathologies générales	32
3.1.1 Modifications physiologiques liées à l'environnement spatial	32
3.1.2 Mesures préventives mises en place	42
3.2 Odontologie au cours des missions spatiales.....	48
3.2.1 Historique de l'Odontologie Spatiale (Rai et Kaur 2011; Gunepin et al. 2012, 2016).....	48
3.2.2 Pathologies bucco-dentaires.....	50
3.2.3 Mesures préventives mises en place	55
3.2.4 Effets des vols spatiaux de longue durée sur la sphère oro-faciale	57
4. Prise en charge odontologique au cours des vols spatiaux.....	64
4.1 Formation médicale de l'équipage.....	64
4.1.1 Formation médicale générale.....	64
4.1.2 Formation aux soins dentaires	65
4.2 Limites des équipements présents à bord	67
4.3 Contraintes liées à l'environnement spatial.....	69
4.3.1 Contraintes physiques.....	69
4.3.2 Contraintes de communication	70
4.3.3 Contraintes pour les soins dentaires.....	70
5. Apports de l'Odontologie Spatiale.....	76
5.1 Application à la Santé Publique.....	76
5.2 Améliorations à apporter.....	77
6. Interviews	78
6.1 Entretien téléphonique avec le Docteur Brigitte GODARD	78
6.2 Interview du Docteur Bernard COMET	82
Conclusion.....	87

Introduction

Aujourd'hui, les missions spatiales habitées connaissent un nouvel essor. De nouveaux grands projets se développent notamment l'exploration de la planète Mars par des astronautes dans les 20 à 30 prochaines années.

Ces nouveaux défis ouvrent la voie à de nouvelles contraintes, notamment médicales. L'organisme n'étant pas adapté à la vie en impesanteur, l'allongement de la durée des missions nécessite une prise en charge médicale particulière des membres d'équipage. Les modifications au niveau oro-facial et bucco-dentaire sont également présentes, aussi, dans ce contexte, l'Odontologie aura donc toute sa place et son importance dans la préparation des missions spatiales habitées.

Après un bref historique, une présentation générale de l'Aérospatiale, une description des contraintes liées à l'environnement en impesanteur et ses répercussions médicales, l'objectif de ce travail a été de s'intéresser plus spécifiquement à l'Odontologie au cours des vols spatiaux. L'anticipation des pathologies générales et dentaires pouvant affecter les membres d'équipage durant leur mission nécessite la mise en place de mesures préventives afin de limiter ces risques. Mais certains incidents peuvent survenir malgré les précautions, et une prise en charge adaptée doit être possible malgré les nombreuses contraintes liées au vol.

Cette revue narrative a été réalisée à partir de références retrouvées sur PubMed selon des MeSH spécifiques (« astronautes », « spaceflight », « microgravity », « dental care », « preventive medicine »), d'articles de revues professionnelles, de documents internes disponibles sur les sites des agences spatiales, ou obtenus directement auprès des médecins spécifiques des astronautes exerçant au sein de ces agences.

Après avoir décrit les applications de l'Odontologie dans le milieu spatial et la préparation des missions, l'interview de personnalités marquantes de la médecine spatiale européenne a permis de concrétiser les connaissances théoriques apportées par ce travail et de préciser les différents actes thérapeutiques réalisables aujourd'hui au cours des missions habitées et les améliorations à apporter dans le contexte de vols spatiaux de longue ou très longue durée.

1. Histoire de la conquête spatiale

1.1 Historique

1.1.1 Un désir ardent d'aventure

L'Homme a par nature toujours été attiré par l'inconnu. Sa soif de découverte l'a poussé à dépasser ses limites afin d'atteindre des horizons inexplorés.

Cela a commencé dès la Préhistoire, il y a environ un million d'années, avec les grandes migrations des homos erectus, puis des homos sapiens qui ont quitté le territoire africain pour gagner tous les autres continents accessibles, en premier lieu par voie terrestre puis par voie maritime.

Ces voyages étaient motivés au début par des raisons évidentes de survie. Mais la curiosité a peu à peu poussé l'Homme à atteindre des zones qui lui étaient jusque-là interdites.

Ainsi, par son ingéniosité, il a réussi à construire des véhicules pour le transporter toujours plus loin, sur terre, dans le ciel, puis hors de la Terre (Dupas 2011).

1.1.2 L'appel du cosmos

L'histoire de la conquête spatiale, c'est à dire l'exploration physique de l'espace, a véritablement commencé le 4 octobre 1957 avec la mise en orbite du premier satellite artificiel Russe Spoutnik 1.

Ce lancement a été très mal perçu par les autorités américaines. James M. Gavin alors directeur de la recherche et du développement de l'armée américaine parla de « Pearl Harbor technologique ». Cet événement a marqué le début d'une course à l'espace entre les Etats-Unis et l'Union Soviétique. Pour chacune de ces deux superpuissances en opposition, la maîtrise de l'espace signifiait sa capacité à atteindre l'autre, notamment avec l'arme nucléaire (Dréer 2007; Dupas 2011).

La réponse américaine ne s'est pas faite attendre puisque 4 mois plus tard, et après quelques échecs retentissants, le 1^{er} février 1958, les Etats Unis envoyaient dans l'espace Explorer 1, leur premier satellite artificiel (Dréer 2007; Dupas 2011).

Le 29 juillet 1958, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) est créée pour rattraper l'avance prise par les soviétiques. Cette agence spatiale gouvernementale est responsable de l'administration et de la réalisation des projets relevant de l'aéronautique civile, jusque-là pris en charge par les différentes branches des forces armées des Etats-Unis.

Alimentée par la guerre froide, cette course à l'espace avait de nombreux objectifs puisqu'elle caractérisait à elle seule la suprématie idéologique, technologique et militaire d'un camp par rapport à l'autre.

Ce sont les Soviétiques qui ont le mieux entamé cette compétition avec en point d'orgue la concrétisation du programme Vostok. Celui-ci avait pour objectif d'envoyer un homme dans l'espace. Ainsi le 12 mai 1961, Youri Gagarine fut placé sur orbite terrestre et rentra sain et sauf au bout de 1 heure et 48 minutes (Figure 1) (Dréer 2007; France 3 2009; Dupas 2011; Baudry 2012).



Figure 1 : à gauche : Photographie de Youri Gagarine ; à droite : Une du Huntsville Times (nasa.gov)

Pour retrouver le prestige mis à mal par l'URSS, John Fitzgerald Kennedy, président des Etats Unis, lança le programme Apollo le 12 mai 1961. Ce programme avait pour objectif de poser un homme sur la lune avant la fin de la décennie. Cet objectif sera atteint le 20 juillet 1969 avec le succès de la très médiatisée mission Apollo 11, qui permit à Neil Armstrong de devenir le premier homme à marcher sur la lune (Figure 2). C'est le premier être humain à poser le pied sur un astre autre que la Terre (Dréer 2007; Dupas 2011; Woods 2011; Baudry 2012).

Aujourd'hui, de nombreuses agences spatiales mondiales ont envoyé leurs astronautes dans l'espace avec pour chacun une dénomination unique (astronaute pour les américains, cosmonaute pour les russes, taïkonaute pour les chinois, spationautes pour les français, ...). Le terme astronaute tend actuellement à se généraliser. Il sera employé de façon générique afin de désigner les femmes et les hommes travaillant dans l'Espace.

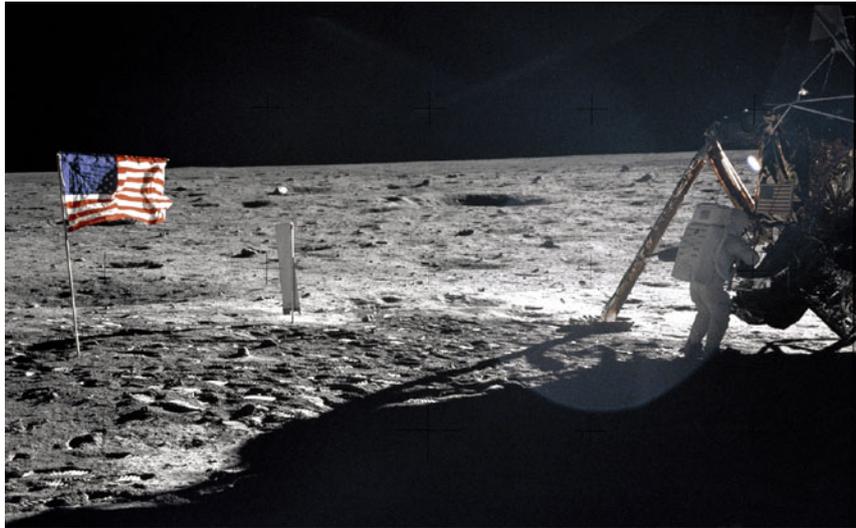


Figure 2 : Photographie de Neil Armstrong sur la Lune au cours de la mission Apollo 11 (nasa.gov)

1.1.3 L'ère des stations spatiales

La réussite du programme Apollo a permis un apaisement dans la surenchère des deux superpuissances. Les budgets alloués aux programmes spatiaux sont aujourd'hui en nette baisse après avoir atteint des sommets à la fin des années 60. Cela passe par la maîtrise des missions de longue durée et le développement des missions scientifiques (Sparrow et al. 2008).

Ainsi apparaissent les premières stations spatiales, la première soviétique avec Saliout dont la vocation initiale était plutôt militaire, puis une américaine avec Skylab mise en orbite le 14 mai 1973 (Dréer 2007).

La station russe Mir (mot russe signifiant « paix » et « monde ») fut assemblée dans l'espace entre 1986 et 1996. Elle a permis une présence humaine permanente dans l'espace. C'est en son sein qu'est détenu le record du plus long vol spatial humain avec 437 jours 17 heures et 58 minutes du 8 janvier 1994 au 22 mars 1995 pour le russe Valeri Poliakov (Dréer 2007; ESA 2008).

Enfin un long travail de collaboration international initié par les Etats-Unis a permis la construction de la Station Spatiale Internationale (ISS) (Figure 3) assemblée dans l'espace de façon modulaire comme la station Mir. Elle est occupée en permanence par un équipage international consacré à la recherche scientifique. Le premier module a été lancé en 1998 et sa construction devrait s'achever en 2018. Elle constitue le plus grand objet artificiel placé en orbite terrestre. Depuis 2009 elle accueille un équipage permanent de 6 personnes restant en moyenne 6 mois sur place.



Figure 3 : Station Spatiale Internationale en 2014 (nasa.gov)

1.2 Contexte actuel

1.2.1 L'après Guerre Froide

Bien qu'ayant démarré très rapidement, avec des exploits technologiques impressionnants qui ont permis de passer de la mise sur orbite du premier satellite à l'envoi d'un homme sur la lune en moins de 12 ans, force est de constater que depuis, les programmes spatiaux d'envergure ont considérablement ralenti.

En effet, depuis 1972 et la dernière mission Apollo, aucun être humain n'est allé au-delà de l'orbite basse terrestre soit une altitude ne dépassant pas 2 000 km (à titre de comparaison, la Lune est située à plus de 350 000 km).

La fin de la guerre froide a parallèlement provoqué l'arrêt de la course à l'espace. Le budget consacré aux missions spatiales a diminué quasi continuellement, passant, pour la NASA, de près de 4,5% du budget fédéral en 1966 à moins de 0,5% en 2012 (Rogers 2010).

1.2.2 Changement d'organisation des agences spatiales

Le coût financier des différentes missions spatiales pèsent sur les agences spatiales gouvernementales surtout en période de crise de la dette et de recherche d'économies par la majeure partie des gouvernements.

La tendance actuelle est donc au désengagement de certains secteurs d'activités moins rentables par les agences spatiales. Le programme de navettes spatiales américaines dont le vol inaugural remonte au 12 avril 1981, est arrêté par la NASA en 2011 (Dréer 2007).

Le vol spatial habité cherche aujourd'hui à devenir un secteur commercial, en témoigne l'essor grandissant des entreprises privées comme Arianespace qui représente 60% du marché des

lanceurs, ou SpaceX à qui la NASA a confié un contrat de transport de fret vers l'ISS (Baudry 2012).

L'objectif principal des agences spatiales est aujourd'hui la recherche scientifique, que ce soit pour les missions habitées, par des collaborations internationales dans l'ISS, ou grâce à des prouesses technologiques comme l'envoi de sondes et de rovers (véhicule d'exploration spatial) robotisés vers d'autres astres du système solaire.

Pour exemples, la sonde européenne Rosetta lancée le 2 mars 2004 et son atterrisseur Philae qui s'est posé sur la comète Tchouri le 12 novembre 2014, ou le rover de la NASA Curiosity (Figure 4) parcourant le sol martien depuis 2012.

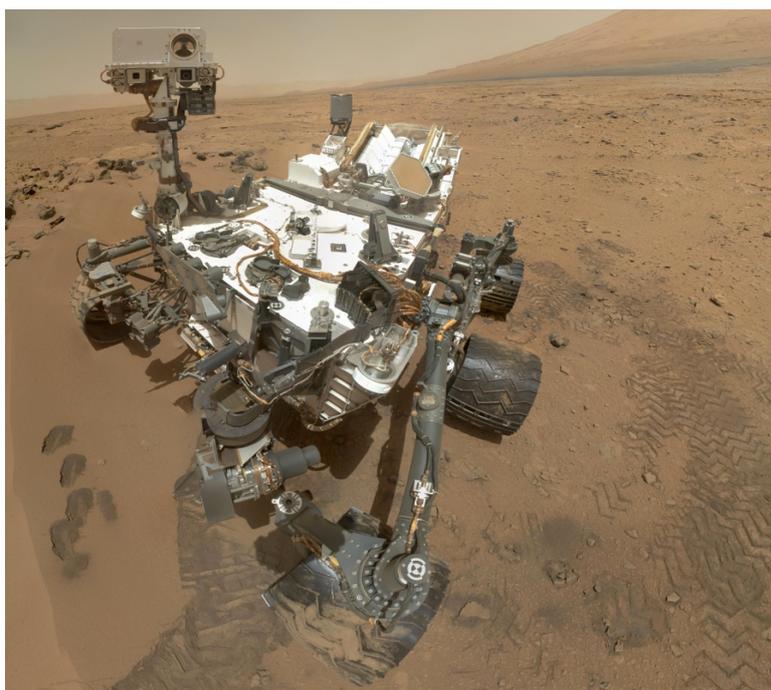


Figure 4 : Rover Curiosity sur le sol martien en 2012 (nasa.gov)

1.2.3 Un nouveau contexte géopolitique

Aujourd'hui, le désir d'indépendance des pays émergents, en particulier la Chine, relance la concurrence dans le domaine aérospatial. Le 15 octobre 2003, les chinois ont envoyé leur premier taïkonaute dans l'espace, Yang Liwei, grâce à Shenzhou 5, le vaisseau spatial qu'ils ont élaboré avec l'aide des industriels russes. Ils lancent même leur première station spatiale indépendante Tiangong 1 en septembre 2011 (Dréer 2007; Gunepin et al. 2012).

Ces démonstrations de forces sont associées à un risque de désolidarisation des Etats envers les collaborations internationales ; les russes ayant menacé de se désengager financièrement de l'ISS à partir de 2020 en réponse à des sanctions économiques imposées par les occidentaux.

Un nouveau déséquilibre des forces est sans doute précurseur de futurs grands projets. C'est ainsi que le 16 avril 2010, Barack Obama président des Etats Unis lance un nouveau plan spatial dans le but d'envoyer des hommes sur Mars à l'horizon 2035 (CBS News 2010).

Ce type de mission de longue durée ouvre la voie à de nouvelles contraintes, notamment d'autonomie médicale. Un voyage aller-retour vers la planète Mars durerait au minimum environ 500 jours et plus probablement entre 800 et 1000 jours, sans possibilité de retour d'urgence sur Terre. A ce jour, aucun homme n'est resté autant de temps dans l'espace et aussi éloigné de toute liaison avec la Terre.

Pour minimiser les risques, il est indispensable de connaître la physiopathologie humaine dans les conditions très particulières que représentent un vol spatial, afin de prévenir ou de traiter tout incident pouvant survenir en cours de mission (Kumar et Norfleet 1992; Gunepin et al. 2012).

2. Les vols spatiaux habités

2.1 Contraintes

Les vols spatiaux habités correspondent à l'envoi d'un équipage humain à bord d'un véhicule spatial au-delà de l'atmosphère terrestre, à son séjour dans l'Espace puis à son retour sur Terre. A chaque étape de sa mission, l'organisme est susceptible de subir de nombreuses contraintes tant sur le plan physiologique que psychologique. Un certain nombre de mesures devra être mis en œuvre pour permettre à l'équipage de s'adapter au mieux à son nouvel environnement, mais aussi pour prévenir et contrôler tout problème médical.

2.1.1 Contraintes physiologiques

2.1.1.1 Décollage

Lors de la phase de décollage, les astronautes sont soumis à des forces d'accélération transverses de type G positif (+Gx). Elles correspondent à des forces antéro-postérieures s'exerçant perpendiculairement à la colonne vertébrale. Ce sont les accélérations les mieux supportées par le corps humain.

Ces accélérations durent quelques minutes. Leurs valeurs ont été réduites au cours du temps, passant de +6,4Gx lors du programme Mercury-Atlas au début des années 60 à environ +3Gx aujourd'hui, au départ de la Terre (Kumar et Norfleet 1992).

La tolérance de l'organisme à ces forces dépend de leurs valeurs mais aussi de la durée de l'exposition. Elle est d'environ 24h à +2Gx, 1h à +4Gx et 6 minutes à +8Gx (Eiband 1959; Creer et al. 1960; Burton 1988; Kumar et Norfleet 1992; Manier 2014).

A cette accélération s'ajoutent les violentes vibrations ressenties dans l'habitacle par les astronautes (Baudry 2007; Manier 2014).

2.1.1.2 Environnement spatial

L'Espace a été défini par la Fédération Aéronautique Internationale (FAI) comme commençant au-delà de la ligne de Kármán située à 100 km d'altitude au-dessus du niveau de la mer. C'est véritablement dans cet espace que l'influence de l'environnement sera la plus importante.

En dehors de la bulle de protection exceptionnelle qu'offre la Terre, rien ne permet à la vie « terrestre » de continuer. Radiations, pression presque nulle, températures extrêmes, absence de pesanteur. Les astronautes se trouvent dans un milieu totalement inconnu et hostile. Ils seront dépendants de leur habitacle et de leur scaphandre lors des sorties extravéhiculaires.

2.1.1.2.1 Radiations

Dans l'espace, à proximité de la Terre, on retrouve de nombreuses radiations extrêmement variées et dangereuses qui sont soit des particules ionisantes (essentiellement des protons et des électrons) prisonnières du champ magnétique terrestres dans les ceintures de Van Allen

(Figure 5), soit peu atténuées par la magnétosphère terrestre comme les rayons cosmiques et galactiques (souvent appelé le « fond galactique ») et les éruptions solaires.

Les radiations présentes au-delà de l'orbite terrestre sont substantiellement différentes des radiations ionisantes auxquelles les êtres humains sont habituellement exposés en orbite circumterrestre. Cela est dû à la présence de particules chargées de haute énergie provenant des vents solaires ou du fin fond de l'espace.

Les connaissances sur les potentielles interactions que peuvent avoir ces rayonnements sur l'ADN, les cellules et les tissus des astronautes sont actuellement insuffisantes (Ball et Evans 2001).

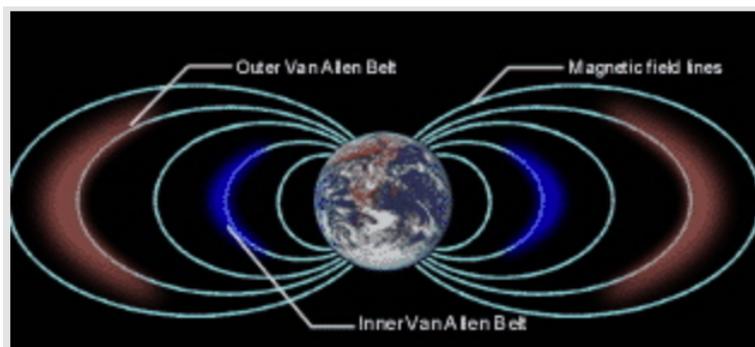


Figure 5 : Schéma des ceintures de Van Allen (nasa.gov)

- Ceintures de Van Allen

Les ceintures de radiation de Van Allen ont été découvertes en 1958 par le physicien américain James Alfred Van Allen. Ce sont des zones toroïdales (forme d'un tore, ou tube courbé) dans lesquelles des particules chargées à haute énergie sont piégées par le champ magnétique terrestre (Figure 6) (Allen 1958).

La ceinture intérieure s'étend de 700 km à 10 000 km d'altitude. Elle est composée principalement de protons à haute énergie provenant de vents solaires et de rayons cosmiques (Baker et al. 2014; Khalatbari 2014).

La ceinture extérieure se situe à une altitude comprise entre 13 000 km et 60 000 km. Sa taille varie fortement. Elle peut ainsi être étirée ou comprimée en fonction des orages magnétiques. Composée de protons, de particules alpha et d'ions oxygènes chargés positivement provenant de plusieurs sources, son énergie est surtout due à la présence d'un nombre important d'électrons à haute énergie issues de la collision ou de l'explosion d'astres. La partie interne de cette ceinture forme une barrière protectrice contre ces électrons de plus de 5 MeV (méga électronvolt) qui n'atteignent ainsi pas la Terre (Baker et al. 2014; Khalatbari 2014; Zell 2015a, 2015b).

Une troisième ceinture éphémère peut apparaître à la suite d'une importante éruption solaire, puis disparaître en quelques semaines. Cette nouvelle ceinture temporaire a été découverte en février 2013 grâce à la sonde américaine Van Allen Probes (Phillips 2013).

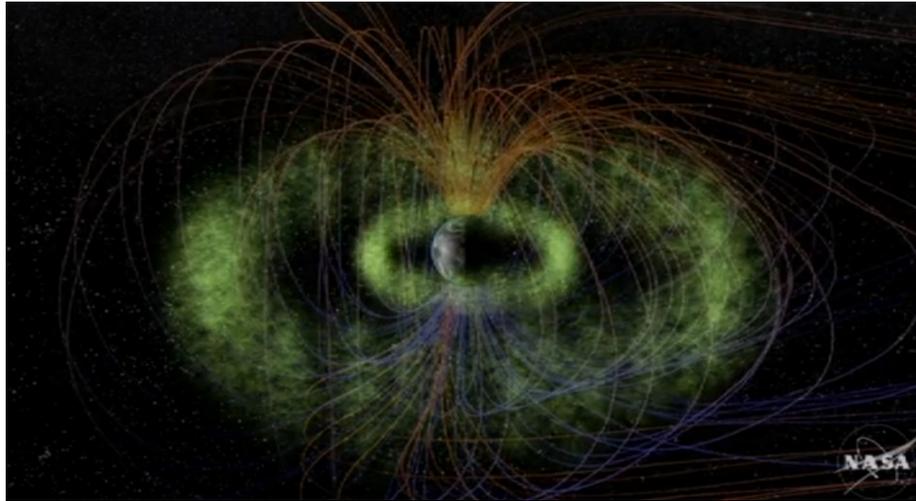


Figure 6 : Ceintures de Van Allen (nasa.gov)

Bien que ces ceintures protègent notre planète de radiations cosmiques pouvant être létales, elles restent des régions dangereuses pour la navigation spatiale. Les particules de haute énergie qui la composent détériorent les composants électroniques et seraient mortelles pour l'homme sans protection appropriée (Johnston et al. 1975; Genevrier 2004; Woods 2011).

L'adoption d'une orbite basse lors des missions habitées autour de la Terre permet de minimiser ces effets. Les membres d'équipage et le matériel restent en-dessous de la ceinture intérieure de Van Allen (Genevrier 2004).

Seuls les astronautes américains au cours des missions lunaires Apollo ont franchi ces ceintures (Woods 2011). Il en serait de même dans l'optique d'une mission habitée vers Mars.

- Eruptions solaires

Les éruptions solaires correspondent à la projection au travers de la chromosphère (basse atmosphère du Soleil) de jets de matière ionisée. Bien que cette projection soit composée au sein de l'espace circumstellaire (partie périphérique du Soleil) de plasma, elle émet des radiations dans l'ensemble du spectre électromagnétique : des rayons gamma aux ondes radios en passant par les rayons X (Chapman et Ferraro 1930).

Certaines éruptions solaires peuvent atteindre la Terre et perturber les transmissions radioélectriques terrestres. On parle alors d'orage magnétique.

Ce sont elles, entre autres, qui sont à l'origine des aurores polaires (aurores boréales au pôle nord et aurores australes au pôle sud) lorsqu'elles entrent en interaction avec le champ magnétique terrestre et la haute atmosphère (Chapman et Ferraro 1930; Marusek 2007).

L'atmosphère terrestre filtre une grande partie de ces rayonnements notamment les ultra-violets (UV) qui sont donc beaucoup plus dangereux dans l'espace.

Les éruptions solaires peuvent en outre blesser les astronautes et endommager les engins spatiaux à cause des rayons de haute énergie émis (Garrel 1995).

Les radiations UV et les rayons X peuvent créer une résistance sur les satellites en orbite basse et réduire ainsi leur durée de vie.

Les éjections de masse coronale (EMC) sont des bulles de plasma produites dans la couronne solaire (Figure 7). Elles sont la plupart du temps associées à une éruption solaire. Elles

provoquent des tempêtes géomagnétiques qui peuvent perturber le champ magnétique terrestre et endommager les satellites en orbite haute (Marusek 2007).

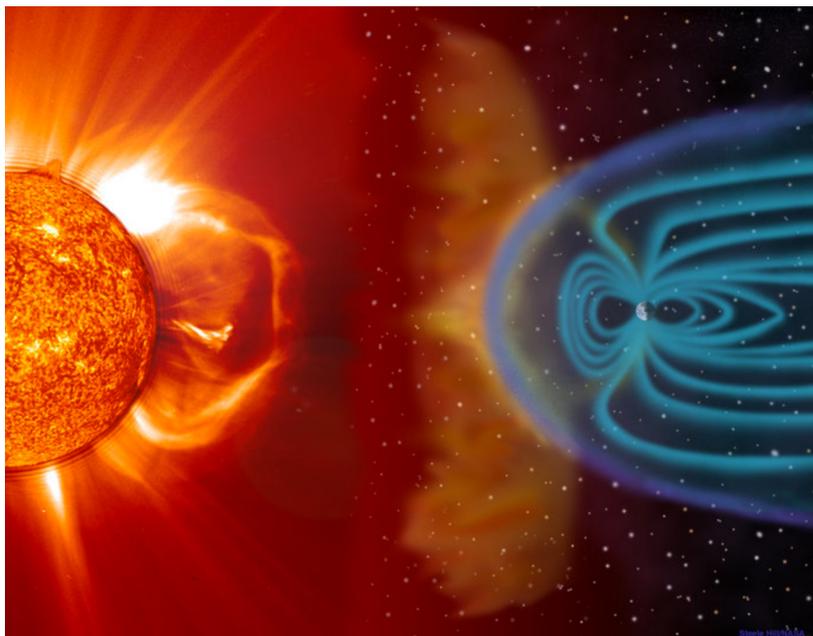


Figure 7 : Illustration d'une éjection de masse coronale et son impact sur la Terre. Les objets représentés ne sont pas à l'échelle (esa.int)

Une gigantesque tempête solaire, la plus importante depuis 1859, aurait pu frapper la Terre à une semaine près, en juillet 2012. En effet, le plasma projeté lors de cette EMC a pris la direction de l'orbite terrestre. Heureusement la Terre n'était plus sur son passage depuis une semaine. Les dégâts auraient été colossaux avec des coûts dépassant les 2 000 milliards de dollars et auraient selon la NASA renvoyer la civilisation contemporaine au XVIIIe siècle (Le Monde 2014; Phillips 2014; Science At NASA 2014).

- Rayons cosmiques

Les rayons cosmiques, également appelés astroparticules, sont composés de particules chargées (protons, noyaux d'hélium, électrons) et de particules non chargées (rayons gamma).

Ces particules sont de très haute énergie, pouvant atteindre jusqu'à 10^{20} eV. Leur provenance est encore aujourd'hui débattue. Elles peuvent être d'origine solaire, galactique ou extragalactique. On parle de sources faisant appel aux phénomènes astronomiques les plus énergétiques : noyau actif de galaxie, sursaut gamma, trou noir, hypernovas, explosion de supernovas.

Une grande partie de ces rayons est piégée par le champs magnétique terrestre dans les ceintures de Van Allen décrites précédemment.

Les rayons qui passent au travers sont largement dispersés par la magnétosphère (région entourant un objet céleste dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés par son champ magnétique) ou bloqués par l'atmosphère. Cependant le personnel navigant des avions et les astronautes peuvent y être exposés de manière significative. Les appareils électroniques peuvent également être endommagés (Dorman 2006; BBC News 2008).

- Radiations reçues pour une mission habitée vers Mars

La NASA, a recueilli les données que le rover Curiosity a enregistré grâce au RAD (Radiation Assessment Detector), son détecteur de radiation embarqué.

Selon ces données, en utilisant les technologies actuelles, les membres d'équipage d'une mission habitée d'exploration de la planète Mars recevraient une dose de radiations de 0,6 Sievert (Sv) au cours d'un voyage de 18 mois (environ 500 jours) soit 400 mSv/an.

Selon l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) cela représenterait 67 fois la dose externe maximale autorisée pour les travailleurs de catégorie A (travailleurs susceptible de recevoir, dans les conditions habituelles de travail, une dose efficace supérieure à 6 mSv par an, ou une dose équivalente supérieure aux 3/10èmes des limites annuelles d'exposition) (IRSN 2016).

Dans ces conditions la NASA estime que le risque de développer un cancer radio-induit est augmenté de 3 % (NASA 2013; Hassler et al. 2014; Manier 2014).

2.1.1.2.2 Impesanteur

La particularité la plus marquante liée aux vols spatiaux est probablement le phénomène d'impesanteur (ou apesanteur) ressenti par les astronautes.

Cette sensation n'est pas due à une absence de gravité, mais à une absence de pesanteur terrestre. Dans le cadre des vols en orbite basse comme pour l'ISS, on parle de microgravité. La gravité terrestre résiduelle reste relativement importante, de l'ordre de 10^{-2} g (g étant la gravité terrestre soit $9,81 \text{ m.s}^{-2}$) (NASA 2010).

C'est le mouvement de rotation de la station spatiale autour de la Terre qui donne cette sensation d'impesanteur. Sa vitesse d'environ 28 000 km/h lui confère une force d'inertie centrifuge qui compense l'attraction gravitationnelle terrestre (CNES 2015).

Le véhicule et ses occupants sont ainsi dans une sorte de chute libre compensée continuellement (Garrel 1995; NASA 2010).

Les conséquences sur l'organisme de cette impesanteur sont nombreuses. Outre la modification importante qu'elle apporte sur les gestes quotidiens et les habitudes de vie des membres d'équipage, l'absence de pesanteur a de fortes répercussions sur la physiologie de leurs organes.

- Variation de la pression sanguine et de la distribution du sang, entraînant une perturbation du système cardio-vasculaire.
- Ostéoporose par décalcification due à la disparition des contraintes mécaniques.
- Fonte musculaire due à la disparition des contraintes mécaniques.
- Troubles de l'orientation par un bouleversement des différents récepteurs vestibulaire et proprioceptifs. Ils ont pour conséquence le phénomène bien connu de syndrome d'adaptation à l'espace ou « mal de l'espace ». Il se caractérise par des nausées, vomissements, somnolence et désorientation. Ce phénomène qui touche près de la moitié des astronautes disparaît tout seul après quelques jours d'acclimatation au nouvel environnement.
- Nombreuses modifications immunologiques, notamment un affaiblissement du système immunitaire.

(Homick 1979; Oman 1987; Garrel 1995; Ball et Evans 2001; Wang et al. 2001, 2003; Sonnenfeld et al. 2003; Davis 2008; Williams et al. 2009; Clément 2011; Manier 2014; Golding et al. 2017).

L'impesanteur représente également une contrainte non négligeable dans le domaine de l'hygiène, tant pour la toilette quotidienne que pour le recueil des excréta. Dans le cas de l'alimentation, il impose un conditionnement particulier des repas qui doivent aussi présenter des propriétés d'adhérence pouvant avoir des conséquences notamment dans le domaine bucco-dentaire (Société française de médecine aérospatiale 1999; Manier 2014).

2.1.1.2.3 Température et pression

Suivant l'orientation du vaisseau spatial par rapport au soleil, la température à sa surface varie de +120°C sous les rayons du soleil, à -160°C dans les zones d'ombre. Cela s'explique par l'absence d'atmosphère filtrant ces rayons (Dréer 2007).

La pression en orbite basse est de 10^{-12} mmHg. On parle de vide spatial, même si cela ne correspond pas au vide physique absolu défini par l'absence de toute matière.

Les astronautes sont protégés de ces conditions extrêmes par leur véhicule et leur scaphandre lors des sorties extravéhiculaires (Garrel 1995; Dréer 2007).

2.1.1.3 Retour

Des contraintes sont également à prendre en compte au retour des astronautes sur Terre. A l'instar du décollage, ils subissent une forte décélération au moment de l'entrée du module dans l'atmosphère terrestre et de fortes vibrations. La valeur de l'accélération et son sens dépend fortement du profil d'entrée dans l'atmosphère. Pour les missions Apollo elle était de l'ordre de 6 à 8 +Gx, alors qu'elle était maintenue à 1,2 +Gz pendant 17 minutes pour une entrée dans l'atmosphère terrestre avec les navettes spatiales américaines (Kumar et Norfleet 1992).

Il est également à noter la survenue d'un syndrome de déconditionnement avec le retour de la pesanteur terrestre. Il se caractérise par une augmentation de la fréquence cardiaque, une diminution du VES (Volume d'Ejection Systolique), une légère diminution des pressions artérielles minimale et moyenne.

Cela va avoir pour conséquences une moins bonne tolérance aux accélérations et une hypotension orthostatique (Pavy-Le Traon et al. 1999; Wang et al. 2001, 2003; Manier 2014).

2.1.2 Contraintes psychologiques

Un certain nombre de facteurs influençant l'état psychologique des astronautes sont à prendre en compte dans le cadre de leurs missions et plus particulièrement dans le cadre d'une mission habitée de longue durée, comme pour un voyage vers la planète Mars.

2.1.2.1 Danger

Certaines étapes du voyage spatial sont connues pour être particulièrement dangereuses. C'est le cas du décollage, des sorties extravéhiculaires ou de l'atterrissage. Il ne faut cependant pas oublier que chaque instant de la mission peut voir survenir un accident d'origine extérieur ou une défaillance technique pouvant mettre en péril la vie de l'équipage.

Outre la conscience du danger, l'état de tension psychologique va être augmenté par un sentiment de vulnérabilité et de dépendance des astronautes. Dans cet environnement hostile, aucun refuge n'est possible en dehors du vaisseau spatial qui les transporte. De plus, un demi-tour vers la Terre semble à priori compromis, voire quasiment impossible, tant que la mission n'est pas terminée.

Au danger latent s'ajoute donc un danger pouvant survenir soudainement. Cela impose une vigilance perpétuelle et une réaction adaptée à chaque situation.

L'état de stress qui en découle est donc à prendre en considération surtout que l'allongement de la durée des missions entraîne statistiquement une augmentation du risque de voir survenir un incident (Rivolier 1997; Horneck et al. 2003; Manzey 2004; Manier 2014).

Cependant, certaines études ont montré que le danger pouvait permettre une amélioration de la cohésion du groupe et une augmentation de la motivation pour l'achèvement de la mission (Fraser 1966; Manier 2014).

2.1.2.2 Charge de travail

Les vols spatiaux de courte durée ont mis en évidence des charges de travail, concentrées sur un temps trop restreint, excessivement importantes pour les astronautes. Le surmenage peut mener à une altération de la performance professionnelle et des erreurs d'inattention ou de jugement.

À l'inverse, les missions spatiales habitées de longue durée riment plutôt avec une charge de travail moins soutenue et des journées pouvant même être monotones. On parle alors de stress occupationnel rythmant entre épuisement et ennui. Le manque de stimulation de l'équipage peut entraîner une baisse globale de la vigilance avec tous les risques que cela peut engendrer (Stuster 1996; Rivolier 1997).

Certains facteurs, liés à la réussite ou à l'échec de la mission, engendrent aussi un stress non négligeable limitant l'efficacité des astronautes.

Les objectifs de la mission, principalement d'ordre scientifique, définissent directement les fonctions et les rôles de chaque membre d'équipage, qui ont été déterminés, sur-mesure, pour chacun en fonction de leurs formations et de leurs compétences respectives.

Réussir la mission c'est aussi revenir en vie et partager le fruit de ses expériences (Rivolier 1997; Manier 2014).

2.1.2.3 Confinement

Au cours des missions spatiales habitées, le manque de place est un des paramètres les plus difficiles à supporter psychologiquement. Pour exemple, l'espace personnel du spationaute français Thomas Pesquet à bord de l'ISS était équivalent à celui d'une cabine téléphonique (Figure 8).



Figure 8 : Photo postée sur Twitter par le spationaute Thomas Pesquet en décembre 2016, avec comme commentaire : « Ma cabine : mon seul espace privé dans toute l'ISS » (T. Pesquet)

Sans un minimum de volume permettant une intimité sommaire, la tolérance au confinement serait très compromise. Plus le voyage sera long et plus il y aura de personnes impliquées, plus l'espace nécessaire sera important (Figure 9) (Davenport et al. 1963; Fraser 1966; Simon et al. 2011).

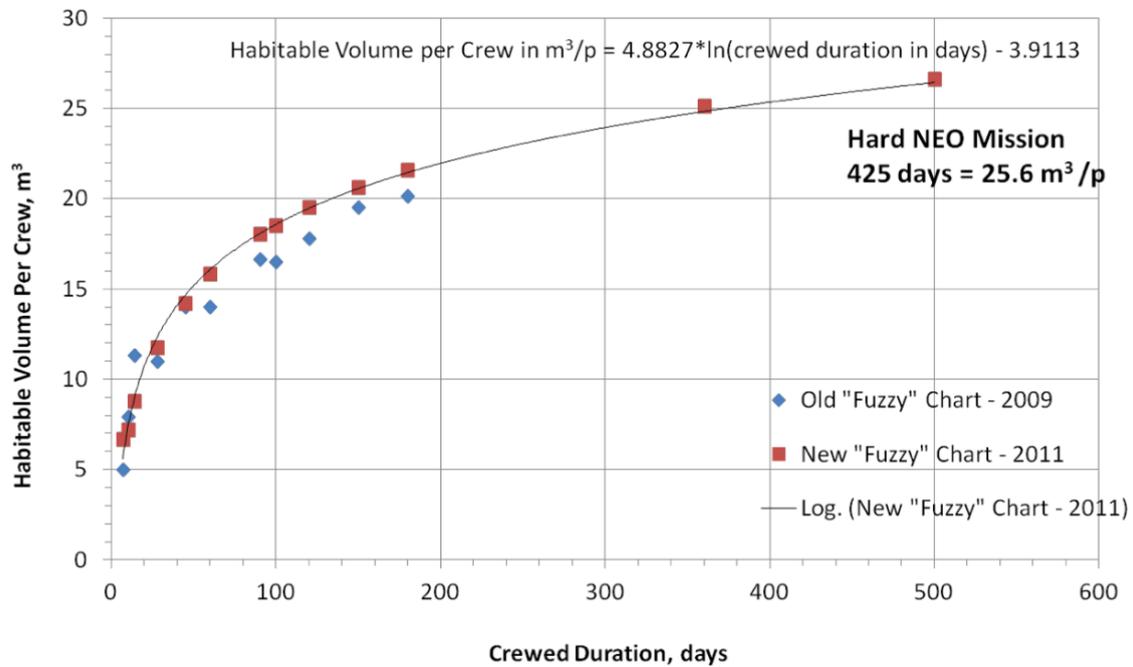


Figure 9 : Volume nécessaire par membre d'équipage en fonction de la durée de la mission (Simon et al. 2011)

Au-delà du manque d'espace, l'impossibilité de sortir du vaisseau spatial entraîne des « déprivations sensorielles » (absence de sollicitation des sens par des variations de décors, de visages, de températures, de sons, ou de sensations).

Certaines études montrent que, privé des stimulations habituelles, le cerveau peut s'emballer et produire ses propres messages chimiques. Cela aboutit à des hallucinations visuelles et/ou auditives, jusqu'à une dégradation générale et durable de l'état psychique (Zubek 1969).

La question du bruit est également à prendre en compte dans les conditions d'atmosphère artificielle du vaisseau spatial. Le ronronnement continu de la ventilation dépasse les 55 décibels et accentue la sensation de monotonie et de confinement (Manier 2014).

La perte du cycle lumineux habituel a pour conséquence une perturbation de la notion du temps. Les repères temporels se limitent à la valeur donnée par les horloges présentes à bord et les montres des astronautes. Il en résulte une distorsion des heures et des journées qui augmente l'état de mal-être ressenti par les membres d'équipage (Siffre et al. 1963; Baudry 1985; Rivolier 1997; Manier 2014).

2.1.2.4 Isolement

Lors des voyages spatiaux de longue durée les rapports sociaux sont limités aux seuls membres d'équipages, soit 2 à 6 personnes. Cela peut entraîner à la fois un resserrement des liens entre les membres d'équipages ou au contraire l'apparition de clivages et de tensions au sein du groupe. De plus, la promiscuité peut rendre difficilement supportable le quotidien à la longue.

Enfin la particularité d'un voyage lointain, outre sa durée importante, est le problème que poserait la séparation des astronautes de la vue de la planète Terre. Cela se produirait en cas de voyage habité vers Mars. Aucun être humain n'a à ce jour été confronté à une telle situation (Rivolier 1997; Manzey 2004; Manier 2014).

2.2 Sélection des astronautes

Avant qu'un astronaute ne puisse partir en mission spatiale, un processus de recrutement puis de formation sera nécessaire. Bien que chaque agence spatiale ait ses propres critères de sélection, la formation en vue d'une mission à bord de l'ISS est en grande partie mutualisée entre les différentes agences spatiales participant au projet. A ce jour, les astronautes européens de l'ESA (European Space Agency) sont tous destinés à une mission à bord de la Station Spatiale Internationale.

2.2.1 Recrutement (Source : ESA.int)

Les nombreuses contraintes relatives aux missions spatiales décrites précédemment imposent aux agences spatiales une sélection rigoureuse des futurs astronautes.

C'est un processus long, dynamique et évolutif qui dure en moyenne 10 mois. Il est sous la responsabilité de toute une équipe composée d'instigateurs du programme, de différents représentants du corps médical et de psychologues.

La sélection se fait en plusieurs étapes :

- Sélection initiale sur dossier
- Tests psychologiques pour les candidats retenus
- Deuxième série de tests psychologiques et entretiens
- Examens médicaux
- Entretien d'embauche.

Le recrutement de nouveaux astronautes est assez rare, le dernier en date pour l'ESA (European Space Agency) remonte à 2008-2009. Elle a abouti à la sélection de 6 astronautes dont le français Thomas Pesquet.

Lors de cette dernière sélection, l'ESA a redéfini des recommandations concernant les critères de sélection dans les différents états membres.

2.2.1.1 Critères généraux

La première étape de la sélection consiste à cibler la population recherchée.

- Etre un homme ou une femme âgé de préférence entre 27 et 37 ans.
- Lire, écrire et parler un anglais courant.

Les membres d'équipage étant presque tous de nationalités différentes, il est primordial que chacun puisse communiquer aisément. De plus, la communication avec la Terre ainsi que les explications et notices inscrites dans les documents et protocoles d'opération à bord sont tous rédigés en anglais. Le russe est la deuxième langue officielle à bord de l'ISS. La connaissance d'une autre langue en particulier le russe est donc un avantage en vue d'une sélection mais ne

sera pas un critère d'exclusion. Les astronautes sélectionnés seront de toute façon amenés à l'apprendre au cours de leur formation.

- Etre diplômés de disciplines scientifiques et avoir fait preuve d'excellentes compétences dans les domaines appropriés, incluant de préférence des compétences opérationnelles. Si la base de leur formation est académique, les candidats doivent être titulaires au minimum d'un diplôme universitaire (ou équivalent) de niveau master ou doctorat, en Sciences Naturelles (Physique, Biologie, Chimie, Mathématiques), Ingénierie ou Médecine. Il est préférable qu'ils aient également une expérience professionnelle de trois ans minimum, ou une expérience de vol en tant que pilote.

Même si cela n'est pas obligatoire, avoir étudié l'aéronautique ou l'astronautique est un atout non négligeable.

Si par contre la base de leur formation est une qualification en pilotage, il leur faudra un bagage minimum de 1000 heures de vol avec des critères variés de haute performance. Ils devront être pilotes d'essais ou détenteurs d'un diplôme académique.

Quelle que soit sa formation, le candidat devra exceller dans tous les niveaux de compétences requis.

2.2.1.2 Critères physiques et médicaux

Il est important que le futur astronaute ait une bonne condition physique. Cela signifie la pratique d'une activité physique régulière adaptée à son âge. L'ESA n'est pas à la recherche d'un sportif de haut niveau. D'ailleurs, un excès de masse musculaire est un inconvénient pour les astronautes en impesanteur.

Selon les critères médicaux établis par l'ESA :

- Les candidats doivent passer avec succès un examen médical JAR-FCL 3, Classe 2 (Join Aviation Requirement – Flight Crew Licencing) réalisé par un médecin certifié par un organisme de médecine aéronautique. C'est un examen médical qui permet de démontrer que le candidat ne souffre d'aucune pathologie (Republic of Moldova 2001).
- Les candidats ne doivent présenter aucune dépendance à la drogue, l'alcool ou le tabac.
- Ils doivent présenter des amplitudes articulaires et fonctionnelles normales pour toutes les articulations.
- Ils doivent avoir une acuité visuelle de 100 % (10/10) pour chacun des yeux, corrigés ou non avec des lunettes ou des lentilles de contact. Il est à noter que la vue est la principale cause d'inaptitude.

La Santé Orale fait partie du processus de sélection. Même après le recrutement des futurs astronautes un examen de l'état bucco-dentaire régulier permettra de décider de l'envoi ou non des astronautes dans l'espace.

Un classement en trois catégories a été établi :

- La Classe I correspond à une bonne santé orale et ne nécessite pas de soins ou de réévaluation au cours des 12 prochains mois.

- La Classe II correspond à un état bucco-dentaire nécessitant la réalisation de soins. Si ces soins ne sont pas réalisés immédiatement, ils ne devront pas être à l'origine d'une urgence dentaire au cours des 12 prochains mois.
- La Classe III correspond à un état bucco-dentaire nécessitant la réalisation de soins. Les lésions constatées peuvent être à l'origine d'une urgence dentaire au cours des 12 prochains mois si les soins ne sont pas réalisés.

On attend des astronautes qu'ils restent toujours au minimum en Classe II, et seuls les astronautes en Classe I pourront être envoyés en mission spatiale.

Tous les traitements nécessaires doivent avoir été réalisés au moins 90 jours avant le départ.

Les astronautes devront s'engager à adhérer à un protocole d'hygiène bucco-dentaire méticuleux. Cela correspond à un souci de prévention permettant de limiter au maximum le risque de voir survenir un problème en cours de mission.

(Zimmermann 2013; Gunepin et al. 2016).

2.2.1.3 Critères psychologiques

Les contraintes psychologiques subies lors des missions spatiales de longue durée sont probablement les plus difficilement supportables par les membres d'équipage. Les critères de sélection psychologiques sont donc les plus sélectifs du processus de recrutement des aspirants astronautes.

Les candidats ne doivent souffrir d'aucun trouble psychiatrique. Ils doivent démontrer des aptitudes cognitives, mentales et sociales leur permettant de travailler efficacement dans un environnement exigeant d'un point de vue intellectuel et social.

Au niveau des critères intellectuels, les candidats doivent faire preuve d'excellence notamment dans les domaines suivants : raisonnement logique, mémoire et concentration, orientation dans l'Espace, coordination psychomotrice, dextérité manuelle et capacité à travailler sous pression. La personnalité d'un candidat doit être caractérisée par une forte motivation, une bonne capacité d'adaptation, ainsi que par un bon esprit d'équipe associé à un faible niveau d'agressivité et une stabilité émotionnelle.

La sélection des futurs astronautes est primordiale afin de limiter les risques de survenue de difficultés au cours des missions spatiales prolongées. Elle n'est cependant pas suffisante. Les aspirants recrutés, ayant les compétences recherchées et une fois déclarés aptes médicalement, devront suivre un long processus de formation. Elle comprend des phases d'entraînement et de préparation (Manier 2014).

2.2.2 Formation (ESA 2015, ESA.int)

Les astronautes recrutés devront suivre une formation de plusieurs années avant de pouvoir être envoyés en mission spatiale. C'est une formation intense et laborieuse qui va changer radicalement leur mode de vie.

L'organisation de missions spatiales est anticipée plusieurs années avant et emploie de nombreuses personnes qualifiées. La formation des astronautes est donc primordiale. Ceux-ci devront être en mesure d'appliquer leurs multiples connaissances et capacités aux tâches pour lesquels ils auront été entraînés afin d'être le plus performant possible dans l'espace.

Le programme de formation nécessite une forte coordination de la part des agences spatiales internationales avec une harmonie dans les sessions d'entraînements des astronautes venant de pays différents.

Chaque astronaute a un plan d'entraînement personnalisé. Cela signifie qu'aucun astronaute n'aura exactement le même entraînement au même moment qu'un autre.

Il y a trois phases de formation chronologique : la formation de base, la formation avancée et la formation spécifique à la mission.

2.2.2.1 Formation de base

Chaque astronaute commence son cycle d'entraînement par une formation de base d'une durée de 16 à 18 mois. Pour les astronautes européens elle a lieu à Cologne, en Allemagne, à l'EAC (European Astronaut Center, ou Centre des Astronautes Européens).

Cette formation leur permet de se familiariser avec leur future carrière en tant qu'astronaute. Elle est divisée en quatre pôles d'entraînement.

- Introduction : les astronautes suivent des cours sur les rapports entre les différentes nations investies dans les programmes spatiaux et leurs agences spatiales, sur les principaux programmes spatiaux, habités ou non. Ils sont formés sur les lois relatives à l'environnement spatial et sur les accords intergouvernementaux qui gouvernent la coopération spatiale internationale.
- Fondamentaux : Ce sont des formations sur des disciplines techniques et scientifiques variées. Cela permet aux astronautes ayant reçus des formations initiales très différentes de se retrouver sur un socle commun de connaissances de base en rapport avec leur future profession.

Ces formations incluent des disciplines techniques comme l'ingénierie spatiale, l'ingénierie électrique, les lois aérodynamiques, la propulsion, les mécaniques orbitales ou les connaissances sur les matériaux et leurs structures. Elles incluent également des disciplines scientifiques comme les recherches sur l'impesanteur (physiologie humaine, biologie, biomatériaux), l'observation de la Terre ou l'astronomie.

- Systèmes spatiaux et opérationnels : Ce programme permet une supervision de tous les systèmes embarqués dans la station spatiale ou autres véhicules spatiaux (structure et design, système de navigation et de contrôle, de régulation thermique, de génération et de distribution de l'électricité, kit de survie, ...). Les astronautes sont également formés sur les différents systèmes au sol comme les sites d'essais, les sites de lancements, les centres de contrôle.
- Compétences spéciales : Il s'agit d'un entraînement nettement plus opérationnel se focalisant sur les compétences spéciales importantes comme les opérations de robotiques, les techniques d'amarrage, l'apprentissage de la langue russe. Ils ont des cours en Science du comportement, sont formés à la plongée sous-marine comme première préparation aux sorties extravéhiculaires. Ils sont initiés à l'impesanteur grâce à des vols paraboliques à zéro-G.

2.2.2.2 Formation avancée

Après l'accomplissement des 16 mois de la formation de base, les astronautes commencent un apprentissage plus spécifique et plus technique. Cette formation avancée dure en moyenne une année et se déroule dans les différents centres d'entraînement des agences partenaires dans le monde (Etats-Unis, Europe, Russie, Canada, Japon).

Elle a pour objectif de développer les compétences et les aptitudes indispensables aux opérations et à la maintenance des systèmes, des équipements et des modules de l'ISS ainsi que des vaisseaux spatiaux permettant d'y accéder ou de la ravitailler.

Les astronautes y apprennent également comment exécuter les missions scientifiques à bord de l'ISS.

Alors que la formation de base était essentiellement théorique, la formation avancée est, elle, beaucoup plus axée sur la pratique. Les astronautes auront ainsi de nombreuses heures de simulations de vols et de manœuvres d'approches vers la station spatiale. Ils ont des mises en conditions pour simuler une urgence ou participent à des entraînements de survie en condition extrême.

C'est uniquement une fois cette phase d'entraînement achevée que les astronautes seront éligibles aux missions spatiales.

2.2.2.3 Formation spécifique à la mission

Dès lors qu'un astronaute est assigné à une mission spatiale il commence une formation spécifique axée sur sa future mission.

Cette formation peut durer 30 mois. Au cours de cette phase d'entraînement, les astronautes vont apprendre tout ce qui est nécessaire à l'accomplissement de leur mission.

Tous les membres d'équipage sélectionnés pour la mission spatiale s'entraîneront alors ensemble. Cette spécificité est très importante. Elle permet en effet aux astronautes d'apprendre à se connaître, à nouer des liens (ils passeront près de 6 mois dans l'environnement confiné de

la station spatiale), mais aussi à travailler ensemble efficacement comme une seule et même équipe. Les rôles et les responsabilités seront partagés entre chacun d'eux.

C'est lors de cette formation que deux astronautes seront sélectionnés afin de devenir Crew Medical Officer (CMO). Ils sont spécifiquement formés afin d'être en mesure de réaliser des soins d'urgence à bord de la station spatiale. Ils apprennent ainsi, entre autres, à anesthésier une dent, traiter une lésion carieuse ou même réaliser une avulsion dentaire (Zimmermann 2013; ESA 2015b).

Cette formation est cependant très restreinte tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Au sein de l'European Astronaut Center (EAC), l'ensemble de la formation médicale est réparti en 3 jours et tous les sujets ne peuvent pas être abordés par faute de temps. La partie consacrée aux soins dentaire ne dure qu'une heure et demi avec entraînement pratique sur mannequin. Elle ne peut donc pas couvrir tous les domaines de la dentisterie pouvant être utiles en cas d'urgence. Afin d'être plus efficaces, les astronautes doivent donc rechercher à enrichir leur savoir dans le domaine par leur propre moyen. Il n'y a donc aucun moyen de contrôler leur compétence notamment dans le domaine des soins dentaires (ESA 2015a).

2.3 Alimentation, hygiène et prévention

L'impesanteur et le manque de place sont des contraintes importantes des vols spatiaux.

Les nombreux instruments présents à bord, les matériaux de rechanges et les outils sont également très encombrants (Rouat 2016).

Les astronautes sont limités dans la quantité d'affaires personnelles qu'ils peuvent embarquer. Elle est d'1,5kg maximum par passager à bord de l'ISS.

Ces conditions très particulières ont de multiples conséquences sur l'alimentation et l'hygiène des astronautes.

La nourriture est conditionnée afin d'être stockée de longues semaines sans détérioration des qualités nutritives et de ne pas prendre de place. L'eau est rationnée et sa consommation est limitée à son stricte minimum.

2.3.1 Alimentation

2.3.1.1 Contraintes liées aux missions spatiales

Pour maintenir les astronautes en bonne santé, leur alimentation doit être nutritive, de bonne qualité et savoureuse. Cela est rendu difficile par les nombreuses contraintes liées aux missions spatiales. Les aliments doivent répondre à un certain nombre de critères :

- Limitation du poids et du volume de ce qui peut être emporté au cours des missions : les produits alimentaires doivent donc être compacts et légers.
- Limitation de l'énergie disponible pour préparer les aliments et de l'eau pour les réhydrater et les cuisiner.

- Durée minimale de conservation à température ambiante des produits alimentaires de neuf mois pour la navette spatiale, un an pour l'ISS et jusqu'à cinq ans pour des potentiels postes planétaires avancés. Les aliments doivent être convenablement préparés et conditionnés pour prévenir toute détérioration du produit. Il existe trois grandes méthodes pour conserver la nourriture envoyée en orbite.
 - La thermo-stabilisation détruit les microorganismes par chaleur et pression.
 - La lyophilisation consiste à assécher la nourriture qu'il suffira de réhydrater à l'eau chaude (Figure 10).
 - L'irradiation aux rayons ionisants permet de détruire certains microorganismes indésirables.



Figure 10 : Réhydratation à l'eau chaude d'aliments lyophilisés (nasa.gov)

- Les aliments doivent être nutritifs et contribuer à une alimentation saine des membres d'équipage. Les plats doivent être équilibrés et adaptés au poids et aux besoins particuliers de chaque astronaute.
- Afin de pallier aux effets de l'impesanteur, les aliments doivent être humides et collants. Ils doivent coller aux couverts des astronautes afin d'être manipulés facilement pendant les repas. Les miettes et particules flottent librement dans l'habitacle et peuvent détériorer les instruments ou finir par obstruer le système de ventilation. Au pain on préfère donc les tortillas.
- La nourriture doit enfin avoir bon goût. Cet aspect est de plus en plus pris en compte par les agences spatiales. L'alimentation est en effet un support psychologique non négligeable pour les membres d'équipage en état de confinement pendant de longs mois. (Gouvernement du Canada 2006; NASA Food Tech 2012; ESA 2016; Gunepin et al. 2016).

Parmi les produits disponibles pour des missions de longue durée sans ravitaillement, on retrouve entre autre :

- Barres de substitut de repas fournissant un tiers des calories journalières et des besoins nutritionnels
- Produits incorporant 25 g de soja par jour dans le régime alimentaire des astronautes

- Produits issus de soja à faible teneur en matières grasses permettant une baisse de la flatulence
- Produits qui incorporent l'okara issu de la production du lait de soja (biscuits, pain, steaks de légume)

(NASA Food Tech 2012; Gunepin et al. 2016).

Les astronautes testent certains aliments plusieurs mois avant le lancement d'une mission dans l'espace.

Pour ajouter de la variété au menu habituel, les membres d'équipage peuvent aussi apporter certains de leurs aliments favoris ou typiques de leur culture, dans la mesure où ces aliments conviennent à l'environnement de la station.

Par exemple, pendant le séjour de Chris Hadfield à bord de l'ISS, les autres membres d'équipage ont eu l'occasion de déguster des aliments canadiens comme des biscuits au sirop d'érable, des rillettes de canard, ou du saumon sauvage fumé glacé.

Les astronautes peuvent partager de temps en temps une partie de leur nourriture bonus personnelle, surtout lors de repas dits « événementiels ». C'est le cas de Thomas Pesquet qui a cuisiné pour ses coéquipiers, à l'occasion des fêtes de fin d'année 2016. Le menu a été élaboré par le chef étoilé Thierry Marx (Figure 11) (ESA 2016).



Figure 11 : Thomas Pesquet montrant le repas du nouvel an cuisiné par Thierry Marx conditionné sous forme de conserves (ESA 2016)

Enfin, la famille des astronautes leur envoie parfois quelques aliments spéciaux, un peu plus à des fins de réconfort que de nutrition en les incluant dans le cargo de ravitaillement de la station spatiale.

2.3.1.2 Conséquences sur la sphère bucco-dentaire

Les spécificités des aliments embarqués au cours des missions spatiales ainsi que les contraintes des vols spatiaux ont de nombreuses conséquences sur la santé bucco-dentaire des astronautes.

Depuis 1959, date de formulation du schéma élémentaire de Keyes (Figure 12), l'expérience acquise en cariologie a permis de distinguer trois catégories de facteurs de risques selon leur niveau d'implication :

- Les facteurs contribuant directement au développement de la carie
- Les facteurs liés à l'environnement buccal
- Les facteurs propres à l'individu

Parmi les facteurs indispensables à l'apparition d'une lésion carieuse, on retrouve le biofilm et les bactéries cariogènes, les glucides dont la quantité dépend du régime alimentaire et les tissus dentaires en tant que site électif de la lésion carieuse (Lasfargues et Colon 2009).

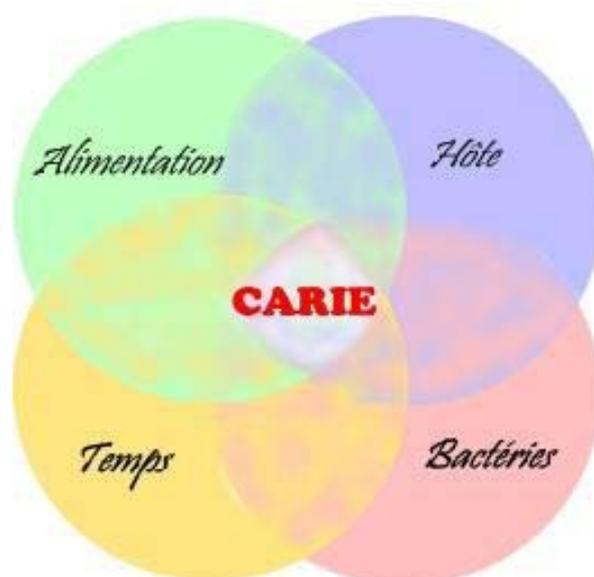


Figure 12 : Schéma de Keyes

Une étude menée en 1974 par Brown et al. montre une augmentation quantitative des *Streptococcus mutans* dans la salive des astronautes consommant des aliments déshydratés identiques à ceux consommés à bord de la station spatiale américaine Skylab trois semaines avant leur envol (Brown et al. 1974). Or cette bactérie joue un rôle central dans le développement de la maladie carieuse (Bradshaw et Lynch 2013). Les streptocoques sont avec les lactobacilles et les actinomyces considérés comme particulièrement pathogènes pour les tissus durs de la dent. Les streptocoques jouent un rôle essentiel dans le déclenchement des lésions carieuses (Lasfargues et Colon 2009).

Si la nourriture consommée à bord des vaisseaux spatiaux entraîne une augmentation des streptocoques indépendamment des autres facteurs environnementaux, alors elle est plus cariogène que celle consommée sur Terre.

Les propriétés physiques des aliments, collants et humides, imposées par l'impesanteur en font une nourriture qui restera plus longtemps en bouche et sur les dents des astronautes. Cela a pour conséquence d'augmenter encore le risque carieux (Bradshaw et Lynch 2013).

La charge de travail parfois importante reposant sur chaque membre d'équipage ainsi que les rythmes de vie et de travail propres à chaque astronaute peuvent conduire à une absence de repas à proprement parler.

Cela a pour conséquence un fractionnement des prises alimentaires avec des petites collations répétées dès que l'emploi du temps le permet.

Stephan a montré dans les années 40 que les prises régulières de glucides empêchaient les systèmes tampons salivaires de fonctionner (Figure 13) et créaient un environnement propice aux déminéralisations (Stephan 1940).

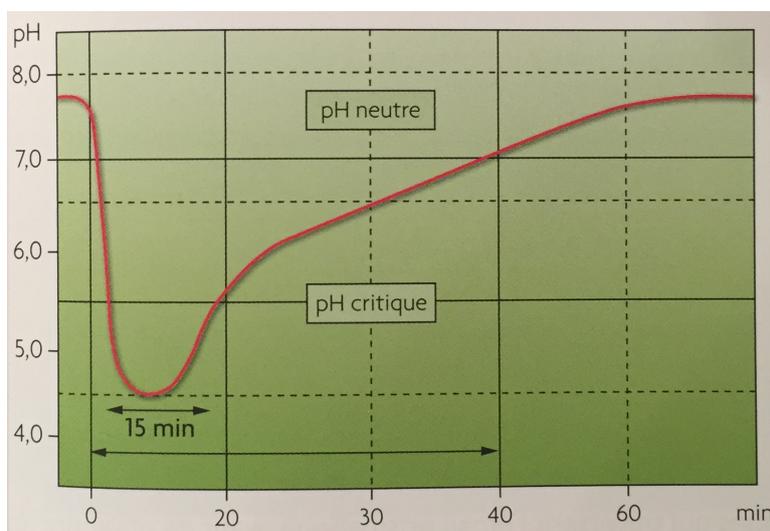


Figure 13 : Courbe de Stephan. Effet d'un bain de bouche contenant 10% de glucose sur l'abaissement local du pH (Lasfargues et Colon 2009)

Ce rythme alimentaire déstructuré associé à la diminution du flux salivaire observé durant les vols spatiaux peuvent donc avoir des conséquences délétères sur la santé bucco-dentaire des membres d'équipage, la salive étant un facteur de protection majeur de la maladie carieuse. Le risque carieux est de fait augmenté.

Plus la durée des missions spatiales sera longue, plus il sera important d'endiguer ce phénomène afin de palier à une augmentation de l'incidence carieuse (Gunepin et al. 2016).

Le phénomène d'impesanteur entraîne une congestion des sinus par une augmentation du volume des fluides vers le haut du corps. On observe également une rétraction des papilles gustatives chez les astronautes. Cela a pour conséquence une perturbation significative des capacités gustatives. La texture des aliments est souvent très similaire pour la plupart des aliments. Cela a pour conséquence une faible appétence pour la nourriture.

2.3.2 Hygiène et prévention

Compte tenu des contraintes liées à l'environnement spatial au cours des missions de longue durée, le risque de survenue d'un incident bucco-dentaire ne doit pas être négligé. L'objectif étant de faire tendre ce risque vers zéro grâce à des mesures d'hygiène et de prévention qui seront prises bien avant le début de la mission spatiale.

2.3.2.1 Avant le vol

Afin de limiter au maximum la survenue d'un incident au niveau bucco-dentaire en cours de mission, il faut s'assurer que les astronautes n'aient pas un problème latent qui risquerait de décompenser au mauvais moment.

La première mesure de prévention intervient au cours de la sélection des astronautes comme nous l'avons décrit plus tôt. En effet, tout candidat doit répondre positivement à l'examen médical JAR-FCL 3, Classe 2, dans lequel un examen buccal d'une heure sera réalisé. Il sera recherché ici la capacité du candidat à s'exprimer et respirer sans difficulté, ainsi que la présence éventuelle de lésion à potentiel malin (Republic of Moldova 2001).

Un examen clinique dentaire approfondi aura également lieu une fois par an pendant toute la durée de formation des astronautes afin de s'assurer que les futurs membres d'équipage ne soient jamais en Classe 3 des catégories décrites précédemment. Seuls les astronautes en Classe 1, à savoir une santé orale ne nécessitant aucun soin ou réévaluation au cours des 12 prochains mois, pourront partir en mission spatiale.

En plus de ce suivi annuel, les astronautes subissent des examens pré-vols 18 à 21 mois avant le lancement et un examen bucco-dentaire additionnel entre 30 et 90 jours avant le départ pour être certain que l'astronaute est indemne de pathologie. Ces examens cliniques et radiographiques incluent systématiquement la réalisation de clichés rétro-coronaires et d'une radiographie panoramique dentaire. Tous les traitements dentaires des pathologies dépistées doivent être réalisés au minimum 90 jours avant le vol.

Jusqu'en juin 2013, la NASA disposait de sa propre clinique dentaire permettant le suivi des astronautes. Face aux contraintes budgétaires, cette clinique a été fermée. Le suivi se fait maintenant dans le privé, les médecins de la NASA étant chargés du contrôle de ce suivi (Zimmermann 2013; Gunepin et al. 2016).

On attend enfin des futurs membres d'équipage qu'ils suivent un protocole d'hygiène bucco-dentaire rigoureux avant et pendant toute la durée de la mission (Zimmermann 2013).

2.3.2.2 Pendant le vol

Les contraintes liées à l'environnement spatial, notamment l'impesanteur et le rationnement de la quantité d'eau utilisable, rendent les gestes d'hygiène de base beaucoup moins aisés.

Les astronautes sont contraints de se laver le corps avec des lingettes humides, ou de se laver les cheveux à l'aide de shampoing sec sans pouvoir se rincer. Ils doivent raccorder leurs rasoirs électriques à un système d'aspiration pendant le rasage ou la coupe des cheveux pour éviter que les poils ne se propagent dans l'habitacle et ne risquent de boucher les systèmes de ventilation (NASA 2004; NASA Johnson 2013).

En ce qui concerne l'hygiène bucco-dentaire (Figures 14 et 15), les astronautes utilisent très peu voire pas d'eau pour se brosser les dents. La NASA a mis au point un dentifrice conçu spécifiquement pour être avalé « NASAdent ». Cela permet d'éviter aux astronautes d'avoir à cracher et surtout à se rincer la bouche (NASA 2004; Canadian Space Agency 2013; Gunepin et al. 2016).

Il est donc impératif d'optimiser son hygiène bucco-dentaire du fait de l'alimentation particulièrement cariogène (Gunepin et al. 2016).



Figure 14 : Astronautes Culbertson et Bursch se brossant les dents dans la navette spatiale Discovery (nasa.gov)



*Figure 15 : Astronaute McArthur se brossant les dents à bord de la navette spatiale Atlantis
(nasa.gov)*

Au retour de mission, les astronautes doivent se soumettre à un examen buccal complet, et un suivi longitudinal à 3 mois, 6 mois, 12 mois et tous les deux ans au cours des 15 années suivant la mission (Genevrier 2004).

3. Odontologie et vols spatiaux

Les contraintes relatives aux vols spatiaux sont responsables de nombreuses modifications physiologiques de l'organisme. Elles peuvent entraîner l'apparition de pathologies sur le plan général, mais aussi au niveau de la région bucco-dentaire.

3.1 Pathologies générales

Les agences spatiales s'appuient sur l'expérience accumulée des vols spatiaux habités et sur les nombreuses expériences menées à bord des stations spatiales depuis plusieurs années afin d'anticiper les réactions de l'organisme et ainsi réduire le risque de survenue d'une pathologie. Mais le recul n'est pas toujours suffisant et il est primordial de s'appuyer également sur l'analyse de la littérature médicale sur des milieux analogues tels que les sous-marins nucléaires en mission de longue durée ou les expéditions scientifiques polaires (Stuster 1996; Komorowski 2013).

Un ensemble de mesures préventives a ainsi pu être mis en place afin de limiter au maximum les modifications physiologiques de l'organisme et ainsi de prévoir un allongement de la durée des missions spatiales.

3.1.1 Modifications physiologiques liées à l'environnement spatial

Les spécificités des vols spatiaux décrites précédemment, notamment l'environnement particulier, le stress physique et psychologique, les changements nutritionnels et surtout le phénomène d'impesance, ont des conséquences importantes sur la physiologie des membres d'équipage. Ces modifications peuvent entraîner l'apparition de pathologies pouvant porter atteinte au bon déroulement de la mission, voire même nuire gravement à la santé des astronautes. Certaines seront transitoires ou complètement réversibles au retour sur Terre, d'autres sont permanentes sur toute la durée de la mission, ou auront un caractère irréversible même au retour à la vie terrestre.

3.1.1.1 Système musculo-squelettique

Les effets physiologiques résultants des missions d'explorations spatiales habitées sur le système musculo-squelettique sont les mieux documentés. Les modifications de la densité osseuse, de la masse et des fonctions musculaires, sont la conséquence directe du phénomène d'impesance subi par les astronautes (Ball et Evans 2001).

3.1.1.1.1 Ostéoporose

La perte de pesanteur a des effets immédiats sur le système musculo-squelettique. La balance entre les ostéoblastes et les ostéoclastes permettant le remodelage osseux est déséquilibrée. On observe ainsi une perte de la densité osseuse, variable selon les individus, survenant dès 24 heures de vie en impesance. La déminéralisation osseuse est un phénomène continu avec une

diminution de la densité de 1% à 2% par mois pendant toute la durée de la mission. La modification de la densité osseuse touche plus particulièrement les os posturaux. Ainsi les vertèbres lombaires, le pelvis, le col du fémur, le grand trochanter, le tibia et le calcaneum subissent une perte de densité osseuse de 8% à 12% au bout de 6 mois en impesanteur.

Cette perte osseuse n'est pas homogène pour un même individu (Williams et al. 2009).

Au retour sur Terre, le processus de réadaptation osseuse est plus lent et plus long que le temps passé dans l'espace. Pour une mission de 6 mois dans la station spatiale, il faut compter 3 ans avant de retrouver des niveaux de densité osseuse similaires à ceux avant le vol (Williams et al. 2009). Mais la microstructure de la corticale osseuse ainsi que de l'os trabéculaire ne retrouvent jamais leur structure initiale malgré le retour à la gravité terrestre (Vico et al. 2017).

Une mission spatiale de plus longue durée, comme un voyage vers Mars de deux ans et demi, détériorerait les os à des niveaux ostéoporotiques (densité minérale osseuse mesurée par ostéodensitométrie avec un T-score < -2,5) si aucune mesure préventive n'est appliquée.

La perte d'os trabéculaire pourrait alors être telle que les ostéoblastes seraient incapables de reconstruire une architecture osseuse malgré le retour sur Terre (Williams et al. 2009).

3.1.1.1.2 Fonte musculaire

De façon concomitante à la perte de densité osseuse, le système musculaire connaît une diminution à la fois de sa masse et de sa force, du fait de l'absence de pesanteur terrestre. La diminution de la sollicitation des muscles entraîne une diminution de la synthèse de protéines musculaires et une augmentation de leur dégradation par l'organisme. Cela a pour conséquence l'atrophie de ces muscles. Ce sont logiquement les muscles du système postural qui sont le plus touchés. On observe une diminution de la masse musculaire allant jusqu'à 20% après seulement 2 semaines de vie en impesanteur et de 30% pour une mission de 3 à 6 mois (Williams et al. 2009).

Le volume de ces muscles est diminué de 20% au bout de 6 mois, tandis que la force décroît, elle, de 50%.

Le stress et l'alimentation seraient des facteurs aggravant de la fonte musculaire.

Dans la majorité des cas, la masse et la force musculaire retrouvent leur valeur de départ au bout de 2 mois de rééducation après le retour des astronautes sur Terre.

3.1.1.2 Système cardio-pulmonaire

Le phénomène d'adaptation physiologique du système cardio-vasculaire en l'absence de pesanteur terrestre est complexe et encore non complètement élucidé. Les différents mécanismes de contrôle incluant le système nerveux autonome, les fonctions cardiaques et la vascularisation périphérique ont tous un rôle à jouer.

Quoiqu'il en soit, la principale cause de cette adaptation peut être attribuée à la redistribution des fluides biologiques vers la tête (Williams et al. 2009).

3.1.1.2.1 Troubles hydro-électrique

La vie en impesanteur a pour conséquence une redistribution des liquides biologiques dans l'organisme. On note une migration des fluides de la partie inférieure du corps vers la tête. Il y a une diminution de 10% du volume des membres inférieurs. Le visage apparaît au contraire œdématié. On parle de syndrome du « visage bouffi et mollets de coq » dans le jargon des astronautes (Figure 16) (Williams et al. 2009; Agence Spatiale Canadienne).

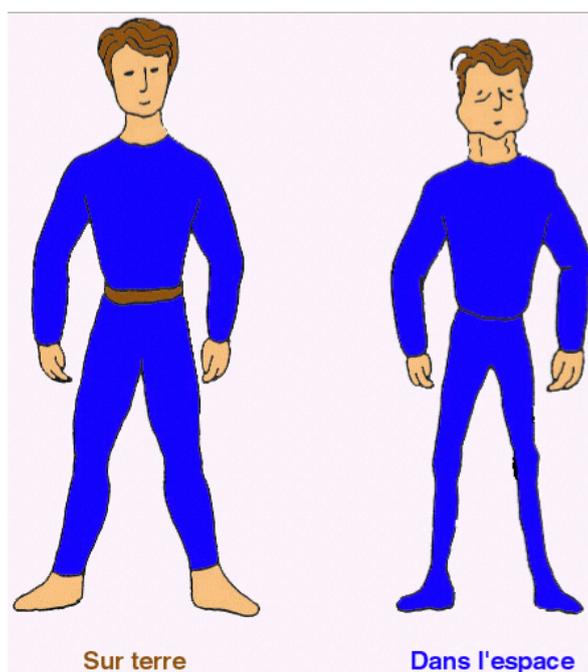


Figure 16 : Dessin représentant l'aspect visage bouffi et mollets de coq des astronautes (Agence Spatiale Canadienne)

La migration des fluides vers la tête entraîne une distension des barorécepteurs situés au niveau des carotides, qui interprètent ce changement comme une hypervolémie. Cela cible une suppression du système rénine-angiotensine-aldostérone et une libération de peptides natriurétiques ayant pour conséquence une augmentation de la sécrétion rénale d'eau et de sodium, et une réduction du volume plasmatique.

Les 24 premières heures dans l'espace sont caractérisées par une diminution de 17% du volume plasmatique entraînant mécaniquement une augmentation de l'hématocrite. La conséquence est une diminution de la sécrétion d'érythropoïétine et donc une réduction de la masse des globules rouges.

Le résultat de cette adaptation est une diminution de l'ordre de 10% du volume de sang total (Williams et al. 2009).

3.1.1.2.2 Hypotension orthostatique

L'hypotension orthostatique correspond à une diminution de la pression artérielle lors du passage de la position couchée ou assise à la position debout. Elle se caractérise par des vertiges, des troubles visuels, une sensation de faiblesse et parfois même un malaise accompagné d'une chute avec perte de connaissance.

Cette chute de pression artérielle résulte d'un défaut d'adaptation posturale de la pression artérielle entraînant une ischémie cérébrale.

Dans le contexte d'un voyage spatial, la cause majeure d'hypotension orthostatique est la faible résistance vasculaire périphérique. En l'absence de pesanteur terrestre, le réseau vasculaire n'a pas besoin de retenir le sang vers le haut du corps. Les résistances vasculaires périphériques finissent par ne plus être adaptées à la gravité (Ball et Evans 2001).

L'hypotension orthostatique n'est donc ressentie qu'au retour à la gravité.

A leur retour sur Terre, les astronautes sont immédiatement pris en charge par une équipe au sol qui s'assurent que leur état de santé est correct (Figure 17). Ils sont placés dans une chaise pour éviter qu'ils aient à se lever et qu'ils ne risquent un malaise et une chute. Les effets s'estompent au bout de 2 à 4 jours et ne sont pas problématiques compte tenu de la surveillance des membres d'équipage par le personnel médical au sol.



Figure 17 : L'astronaute Thomas Pesquet à son retour sur Terre (Europe1.fr)

Le problème se poserait en revanche dans le cadre d'une mission d'exploration spatiale. En effet, non seulement le temps passé en impesanteur serait plus important, mais après un atterrissage sur la planète Mars, les astronautes seraient soumis à une gravité de 0,4G. Certes la pesanteur y serait plus faible que sur Terre, mais si une procédure urgente nécessite un déplacement rapide des membres d'équipage juste après l'atterrissage, les conséquences d'une hypotension orthostatique pourraient alors mettre à mal le déroulement de la mission.

3.1.1.2.3 Modifications au niveau pulmonaire

D'un point de vue général, il est observé une amélioration globale de la fonction pulmonaire en impesanteur sans que cela ne soit complètement expliquée.

Les observations signalées au niveau pulmonaire montrent de légères modifications dans le schéma de ventilation en impesanteur. On note une diminution du volume courant avec une fréquence de ventilation accrue. Il y a une diminution de l'espace mort avec une absorption normale d'oxygène et une capacité de diffusion du dioxyde de carbone améliorée (Figure 18).

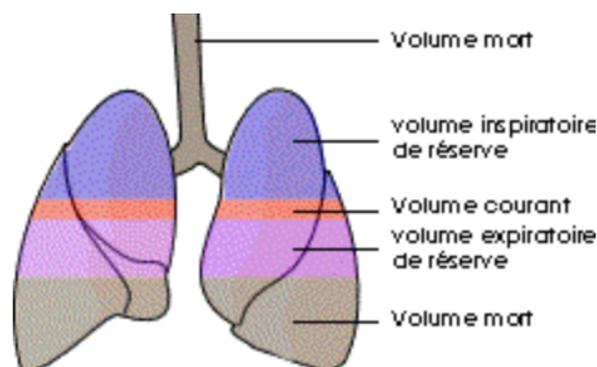


Figure 18 : Schéma des volumes respiratoires (botanic06.com)

Aucun problème significatif de changement observé sur la physiologie pulmonaire n'a été identifié au cours des missions spatiales (Ball et Evans 2001).

3.1.1.3 Système digestif et urinaire

3.1.1.3.1 Troubles nutritionnels

Malgré de nombreuses années de recherches approfondies sur l'alimentation au cours des missions spatiales et l'amélioration significative de la qualité et de la diversité des repas à bords, les agences spatiales restent confrontées à des problèmes de perte de poids, de déshydratation et de pertes d'appétit des membres d'équipage (Ball et Evans 2001).

Le déficit calorique calculé chez un astronaute de 70 kg peut aller jusqu'à 1330 kcal par jour. Il s'agit d'une forme d'anorexie liée à l'impesanteur, à la perturbation du rythme circadien et au stress. Les conséquences sont une diminution de l'endurance et de la performance des astronautes (Da Silva et al. 2002).

3.1.1.3.2 Modifications du système urinaire

La perte de fonction du système musculo-squelettique en impesanteur et le phénomène d'ostéoporose qui l'accompagne, décrit précédemment, s'accompagne d'une décalcification osseuse, avec une augmentation de la sécrétion de calcium dans les urines. Des changements significatifs de pH urinaire et des taux de citrates sont enregistrés.

A cela s'ajoutent une perturbation de la miction (7 cas rapportés) probablement liée à l'absence de pesanteur ainsi que quelques cas de fuites urinaires.

Tous ces facteurs entraînent une augmentation importante du risque de formation de lithiases urinaires dont l'incidence peut aller jusqu'à 5% (Ball et Evans 2001).

3.1.1.4 Système nerveux

Les nombreuses contraintes liées à l'environnement spatiale vont avoir des répercussions au niveau du système nerveux des membres d'équipage. L'absence de pesanteur va perturber le système vestibulaire de l'équilibre, l'afflux de sang au niveau de la tête va diminuer la capacité visuelle des astronautes, le changement drastique du cycle nyctéméral va entraîner une perturbation du rythme circadien et des troubles du sommeil. Enfin le confinement, l'isolement et le stress de la mission vont jouer un rôle négatif au niveau psychosocial.

3.1.1.4.1 Troubles de l'orientation

Quel que soit le milieu dans lequel se trouve le corps humain, le cerveau reçoit les informations de son environnement, par les yeux (appareil visuel), par les muscles et les tendons (proprioception), et par un ensemble de capteurs sensibles aux mouvements du liquide situé dans les canaux de l'oreille interne (système vestibulaire) (Agence Spatiale Canadienne).

Le système vestibulaire est un organe sensoriel situé dans l'oreille interne (Figure 19). Il est composé du labyrinthe postérieur (3 canaux semi-circulaires orientés dans les 3 plans de l'espace et deux cavités, utricule et saccule) contenant l'endolymphe, du nerf vestibulocochléaire (VIII, nerf crânien) et de ses noyaux encéphaliques. Il joue un rôle central dans l'équilibre.

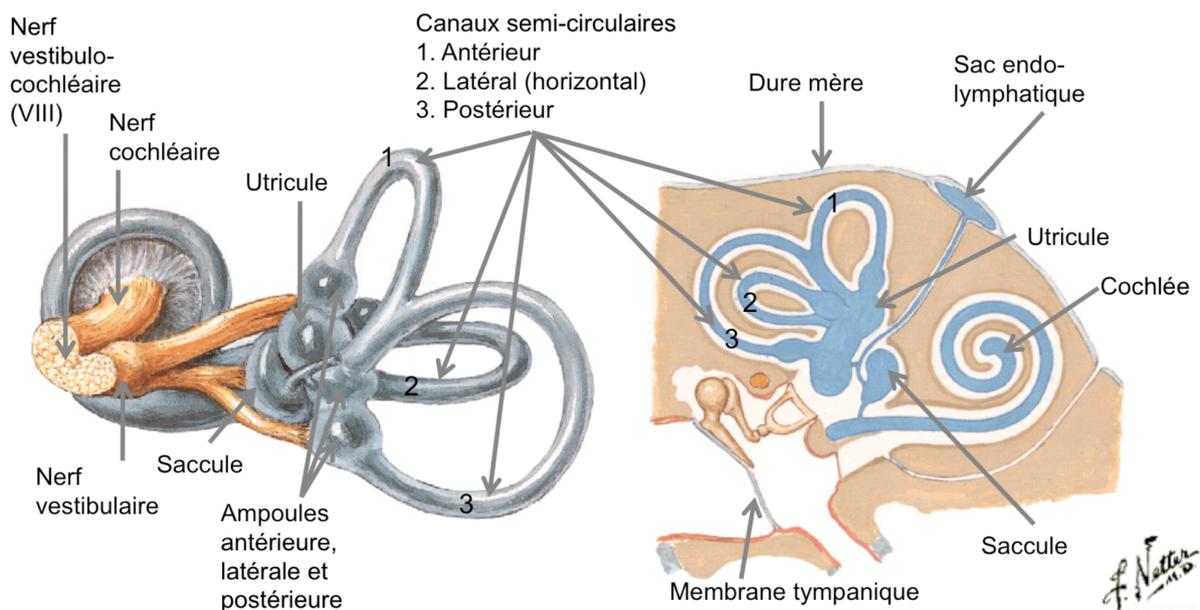


Figure 19 : Planche anatomique représentant le système vestibulaire (Netter 2011)

Les signaux sensoriels issus du système vestibulaire sont principalement envoyés aux structures neuronales qui commandent certains mouvements oculaires et certains muscles responsables de la posture.

En impesanteur, le système postural n'a plus de raison de fonctionner. Cela induit une perturbation du système vestibulaire qui n'est pas adapté à ce nouvel environnement. Il y a une incohérence entre l'orientation visuelle, la position du corps de l'astronaute et les informations fournies par le système vestibulaire. C'est la principale cause du syndrome d'adaptation à l'espace décrit précédemment.

Durant les premiers jours en impesanteur, les gestes sont imprécis et les astronautes ne semblent pas à l'aise avec leur corps. Comme un adolescent qui a grandi d'un coup et qui ne sait pas trop contrôler son corps (CNES 2017).

L'organisme s'adapte cependant rapidement et dès 48 heures le malaise est révolu et les membres d'équipage prennent un certain plaisir à se déplacer sans contrainte.

3.1.1.4.2 Syndrome d'adaptation à l'espace

Le syndrome d'adaptation à l'espace ou « mal de l'espace » est un problème qui touche près de la moitié des astronautes dès le début du vol spatial. Il se traduit par des maux de tête, une pâleur du visage, des sueurs, des malaises, une désorientation, des nausées et vomissements. Les symptômes disparaissent complètement au bout de 2 à 3 jours. Il est lié à une perturbation du système vestibulaire (Williams et al. 2009).

Bien que ce syndrome soit considéré comme un problème mineur, les sorties extravéhiculaires en scaphandre ne sont pas permises durant les 3 premiers jours. Cela afin de prévenir le risque de vomissement et de malaise durant cette phase de la mission (Ball et Evans 2001)

Un syndrome d'adaptation à la Terre, avec des symptômes équivalents, peut aussi toucher les astronautes au retour à la gravité terrestre.

Il est primordial de développer des mesures préventives pour limiter ces symptômes dans l'optique d'un retour sur la Lune ou d'une mission sur Mars où une pesanteur correspondant à 38% de celle de la Terre est à prendre en compte (Williams et al. 2009).

3.1.1.4.3 Troubles visuels

Les missions spatiales de longue durée entraînent une dégradation significative des capacités visuelles des membres d'équipage. Les effets précis de l'environnement spatial sur l'œil humain et le cerveau restent mal définis. Au cours de la dernière décennie, la division médecine de la NASA a documenté divers degrés d'œdèmes du disque optique (Figure 20), d'aplatissement des globes oculaires (Figure 21), de plis choroïdaux (Figure 22), une augmentation de l'hypermétropie, des rétinopathies et une augmentation de la quantité de liquide cébrospinal dans la gaine du nerf optique (Figure 23) (Lee et al. 2016).

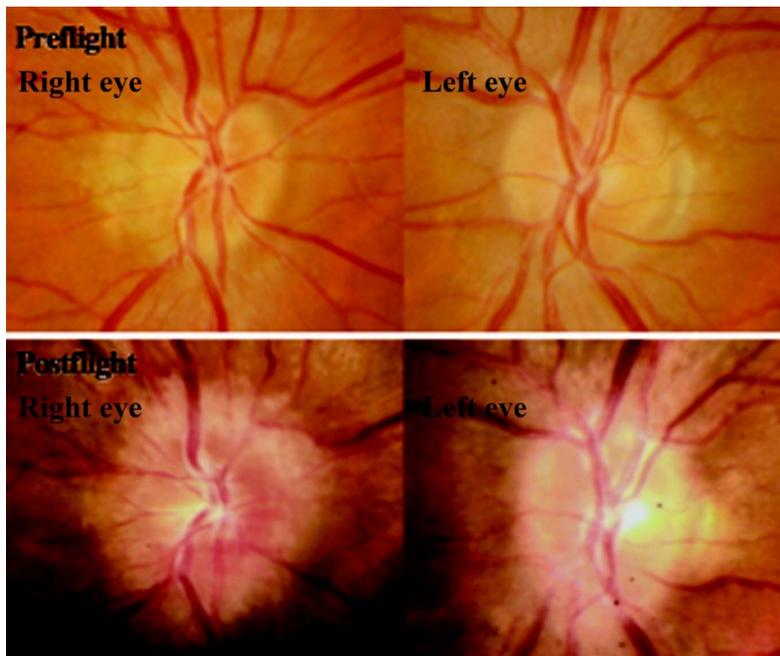


Figure 20 : Fond d'œil avant et après un vol spatial de longue durée montrant l'apparition d'un œdème du disque optique

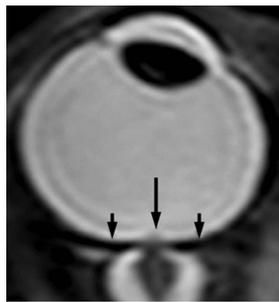


Figure 21 : IRM montrant l'aplatissement en postérieur du globe oculaire.

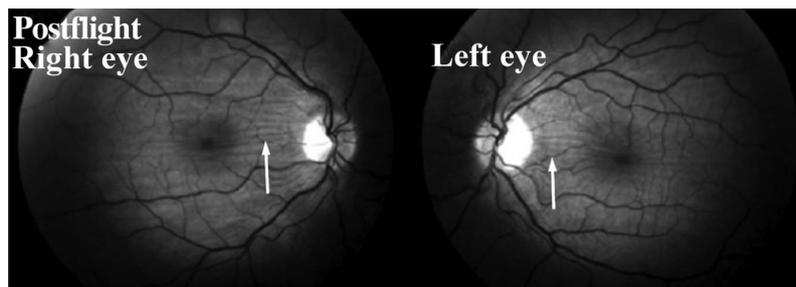


Figure 22 : Fond d'œil mettant en évidence les plis choroïdaux

(Lee et al. 2016)

Il a été remarqué des similitudes entre les atteintes oculaires chez les patients souffrant sur Terre d'hypertension intracrânienne idiopathique et ceux observés chez les astronautes après une mission de longue durée. Mais des différences nettes et surprenantes ont également été remarquées. Cela laisse suggérer une réponse neuro-ophtalmologique spécifique à une longue exposition à l'impesanteur.

L'imagerie pré-vol et post-vol montre que l'aplatissement du globe oculaire et la protrusion du nerf optique sont associés à une augmentation significative du volume de liquide cébrospinal au niveau de la gaine du nerf optique et des ventricules cérébraux.

Paradoxalement, le volume du tissu cérébral ne change pas (Alperin et al. 2017).

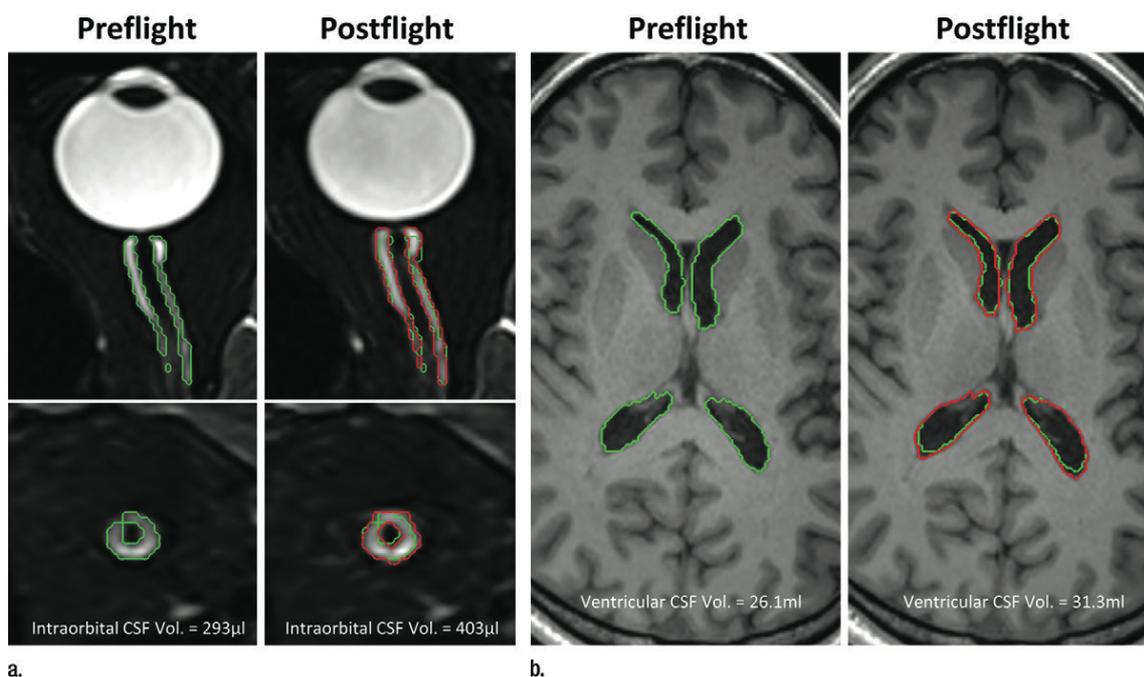


Figure 23 : IRM comparant les volumes contenus dans la gaine optique (a) et les ventricules cérébraux (b) avant et après une mission spatiale de longue durée (Alperin et al. 2017)

Les questionnaires médicaux réalisés à l'issue de 300 vols spatiaux montrent que 60% des astronautes en missions spatiales de longue durée présentent une dégradation temporaire de leur acuité visuelle (vision proche et à distance) (Lee et al. 2016).

3.1.1.4.4 Troubles du sommeil

En mission spatiale, les astronautes ne sont plus soumis aux cycles de la Terre et à l'alternance entre le jour et la nuit toutes les 24 heures. En orbite dans la station spatiale internationale, à la vitesse de 28 000 km/h, les astronautes connaissent un lever et un coucher de soleil toutes les 90 minutes. Dans l'optique d'un voyage sur Mars, il n'y aurait tout simplement plus de coucher ni de lever de soleil durant le vol spatial. Sur la nouvelle planète, la durée des journées sera de nouveau similaire à celle de la Terre, soit un peu plus de 24,6 heures. De plus, il règne, au sein de l'ISS, une intensité lumineuse assez faible mais continue. Dans ce contexte, le cycle nyctéméral est considérablement perturbé et, de fait, le rythme circadien des astronautes. La première expression de ce « décalage horaire » est une perturbation de la qualité du sommeil des membres d'équipage.

Des données issues des missions sur Mir montrent une diminution de la durée et de la qualité du sommeil (Ball et Evans 2001).

La fatigue ressentie par les astronautes peut entraîner une réponse anormale au stress, diminuer les performances et accentuer les changements d'humeur.

Les vols spatiaux de longue durée provoqueront encore plus de troubles du sommeil avec des anomalies associées. Cela pourrait résulter d'une perturbation de l'axe entre l'hypothalamus et

la glande pituitaire, qui entraînerait une augmentation de la sécrétion d'hormone de croissance, et des changements de périodes de pics de cortisol (Ball et Evans 2001).

3.1.1.4.5 Effets psychosociaux

Grâce à leur sélection et leur formation, les astronautes présentent de compétences techniques liées aux objectifs de la mission et des compétences comportementales qui leur permet de travailler avec une équipe multiculturelle (Williams et al. 2009).

Une équipe au sol appuie les membres d'équipage et supervise la réalisation des objectifs de la mission. L'attente liée à cette mission est considérable. Bien que cette supervision puisse être bénéfique pour la réussite de leur tâche, le sentiment de surveillance permanente et la concentration que nécessitent certains travaux engendrent un stress important pouvant nuire aux rapports entre les membres d'équipages. Ce sentiment est exacerbé durant les sorties extravéhiculaires, des missions de plus de 6 heures, où chaque geste de l'astronaute est suivi en direct par la base au sol grâce à une caméra positionnée à l'avant du scaphandre avec un contact radiophonique permanent.

L'environnement du vol, à savoir les températures extrêmes, la désynchronisation circadienne, le bruit continu des nombreux appareils, peuvent contribuer à la fatigue et à la perte de sommeil. Cela augmente la probabilité d'un astronaute de commettre une erreur, diminue la capacité de chaque membre d'équipage à faire face à l'adversité, à la frustration et aux défis interpersonnels (Williams et al. 2009).

Mais le stress lié aux vols spatiaux ne touche pas seulement les membres d'équipage. Les familles et les proches restés au sol en subissent aussi les conséquences (risques pris par leur conjoint ou leur parent et solitude). Le conjoint sur Terre se retrouve seul face à toutes les responsabilités familiales (Williams et al. 2009).

Ce contexte augmente le sentiment d'isolement des astronautes et peut avoir des conséquences sur leur capacité à accomplir pleinement leur mission. Il est en effet difficile de prévoir leur réaction devant la maladie ou le décès d'un proche avec l'impossibilité de retourner sur Terre.

3.1.1.5 Système immunitaire

La première observation de la dérégulation du système immunitaire chez les astronautes date des années 1960 et 1970. La moitié des astronautes ayant participé aux missions Apollo ont présenté des infections bactériennes ou virales qui se sont produites pendant le vol ou peu de temps après leur retour sur Terre.

Les échantillons de sang provenant de 9 astronautes après leur mission à bord de la station spatiale américaine Skylab ont montré que l'activation des lymphocytes T par des substances mitogènes était considérablement réduite par rapport à celle des échantillons avant le vol et des échantillons du groupe contrôle.

Les observations de l'état immunitaire des astronautes après l'atterrissage ont montré de nombreux changements. Parmi ceux-ci, une modification de la répartition des leucocytes

circulants, une modification de la production de cytokines, une diminution de l'activité des cellules natural killers, une diminution de la fonction des granulocytes, une diminution de l'activation des lymphocytes T, des niveaux insuffisants d'immunoglobulines, la réactivation de virus latents comme le virus de l'herpès et une altération des réponses neuroendocriniennes (Williams et al. 2009).

La détérioration de l'immunité immédiate à l'issue de la mission spatiale est probablement le reflet des niveaux très élevés de stress physique et psychologique subit par les astronautes. Les taux circulants de glucocorticoïdes et de catécholamines sont augmentés au cours des vols spatiaux et peuvent altérer les fonctions du système immunitaire.

Le rôle des rayonnements ionisants sur le dysfonctionnement immunitaire n'est pas encore certain.

L'impesanteur peut également contribuer à la diminution des capacités immunitaires des astronautes. En effet, des études en vol et au sol ont montré que l'absence de gravité perturbe les voies de signalisations essentielles à l'activation précoce des lymphocytes T et conduit à une altération de l'agencement du cytosquelette et des centres d'organisation des microtubules (Williams et al. 2009).

L'impesanteur et l'environnement stressant dans lequel séjournent les membres d'équipage peuvent altérer la virulence des bactéries et augmenter la résistance bactérienne aux antibiotiques (Cervantes et Hong 2016)

La majeure partie de notre connaissance se limite aux vols spatiaux en orbite basse terrestre. Très peu de cas de maladies infectieuses à bord de vaisseaux spatiaux ont pu compromettre une mission. Mais la perspective d'un vol habité vers Mars ouvrirait la problématique de l'action des rayonnements ionisants sur le système immunitaire.

3.1.2 Mesures préventives mises en place

Les modifications physiologiques au cours des vols spatiaux sont dues à la spécificité des missions et notamment à l'environnement (impesanteur, confinement).

Pour limiter au maximum ces modifications et prévenir l'apparition de pathologies, de nombreuses mesures préventives ont été mises au point. La quasi-totalité de celles-ci tendent à rendre la vie dans l'espace la plus proche possible de celle sur Terre, ou du moins de simuler partiellement les conditions de vie sur Terre.

3.1.2.1 Ostéoporose et fonte musculaire

Pour lutter contre l'ostéoporose et la fonte musculaire, des exercices physiques sont imposés à chaque membre d'équipage à raison de 2 heures d'activités physiques par jour pendant toute la durée de la mission. On y retrouve un tapis de course (Figure 24) simulant la gravité terrestre grâce à deux élastiques reliés à un harnais, un vélo « d'appartement » et une machine de musculation pouvant recréer jusqu'à 272 kg de forces grâce à deux cylindres pneumatiques (Figure 25). Elle permet de travailler de façon ciblée tous les muscles du corps trop peu sollicités par la vie en impesanteur (European Space Agency, ESA 2017).



Figure 24 : Astronaute américaine Sunita Williams courant sur le tapis de course à bord de l'ISS en 2007 (nasa.gov)



Figure 25 : Astronaute Canadien Robert Thirsk s'entraînant sur la machine de musculation ARED à bord de l'ISS (nasa.gov)

3.1.2.2 Hypotension orthostatique

L'absorption orale d'une solution isotonique et de gélules de sel, plusieurs jours avant le retour sur Terre, a pour rôle de compenser en partie la perte de volume sanguin au cours de la mission (Williams et al. 2009).

Le problème de l'hypotension orthostatique au retour sur Terre est maintenant bien documenté. Il a ainsi été créé des combinaisons à pression négative dans le bas du corps que les astronautes doivent porter plusieurs heures avant de quitter l'ISS. Elles permettent une redistribution des fluides biologiques équivalente à ce que l'on retrouve sur Terre. Ils enfilent ensuite une combinaison anti-gravité qu'ils porteront pendant toute la phase d'atterrissage évitant un œdème des membres inférieurs au retour de la pesanteur terrestre.

Les astronautes sont immédiatement pris en charge après leur atterrissage par une équipe au sol qui les aide à sortir de leur module. Ils sont placés sur une chaise et restent assis quelques heures pour éviter une chute.

Le problème se posera par contre au moment où les membres d'équipage débarqueront sur Mars. La pesanteur y représente 38% de celle de la Terre et aucune prise en charge n'est possible. Des mesures préventives doivent donc être trouvées pour pallier à cela.

3.1.2.3 Alimentation

Même si des progrès restent à faire, l'alimentation a connu depuis les débuts de l'ère spatiale habitée une nette amélioration. Les plats sont plus variés, les saveurs ont été renforcées, les repas goûtés et validés par les astronautes avant le vol, des fruits et légumes frais sont livrés à chaque ravitaillement de la station spatiale, soit tous les 3 mois, et certains légumes commencent à être cultivés à bord de la station spatiale pour être dégustés sur place (Figure 26).



Figure 26 : Plantes de salade romaine en culture à bord de l'ISS (nasa.gov)

Les cultures pouvant être réalisées dans l'espace sont celles de choux, carottes, cardes, haricots secs, salades, oignons, arachides, pommes de terre, radis, riz, soja, épinards, patates douces, tomates et blé (NASA Food Tech 2012).

Les systèmes de transformation agroalimentaire ont évolué pour fonctionner en microgravité (ISS) ou en gravité réduite (postes avancés planétaires ou lunaires).

A cela s'ajoutent des repas de fêtes préparés par de grands chefs et des aliments envoyés par les proches des astronautes afin de lutter contre la routine.

Cependant, les efforts doivent se poursuivre pour que l'alimentation soit le plus proche possible de celle consommée sur Terre. Et ceci d'autant plus qu'au cours d'une mission habitée d'exploration de Mars, aucun ravitaillement de produit frais ne sera possible (Figure 27).



Figure 27 : Illustrations des « futures » cultures sur Mars (nasa.gov)

3.1.2.4 Syndrome d'adaptation à l'espace

L'emploi de médicaments est courant pour lutter contre les symptômes du syndrome d'adaptation à l'espace. Des antiémétiques comme la prométhazine ou la scopolamine peuvent être utilisés pour agir sur la symptomatologie le temps que l'organisme s'habitue à l'absence de pesanteur.

Les nombreux entraînements avant le vol spatial sur centrifugeuse ont permis à l'organisme des astronautes de lutter contre les effets du décollage et de la vie en impesanteur. Elle permet d'acclimater les futurs membres d'équipage à l'inadéquation entre la vue et la position du corps. Le astronautes français Léopold Eyhart a dit « La centrifugeuse est surtout une machine qui habitue à être malade » (CNES 2017).

3.1.2.5 Troubles du sommeil

Pour les troubles du sommeil, l'utilisation ponctuelle d'hypnotiques à action rapide permet de prévenir la perte de sommeil et l'accumulation de fatigue. Le modafinil est un psychostimulant utilisé pour améliorer la performance des astronautes en déficit de sommeil (Williams et al. 2009).

3.1.2.6 Lithiases urinaires

L'augmentation de la quantité d'eau disponible à bord permet de lutter contre la formation de lithiases urinaires. Il est recommandé que les astronautes puissent disposer de 2,5L d'eau potable par jour. Avec une eau en abondance, les membres d'équipage n'hésiteraient pas à boire en quantité. La mise en place d'un suivi quotidien du volume d'eau minimum consommé par les astronautes limiterait également le risque de calculs rénaux. (Ball et Evans 2001)

La miniaturisation d'une machine à ultrasons pour échographie et son embarquement à bord pour les voyages spatiaux de longue durée, permettrait d'identifier précocement la formation de lithiases urinaires chez les astronautes. Ils pourraient ainsi augmenter la quantité d'eau consommée et prévenir la croissance des calculs (Ball et Evans 2001).

3.1.2.7 Effets psychosociaux

Le processus de sélection des astronautes avant une mission spatiale est extrêmement discriminant, mais pourtant capital pour prévenir au maximum l'apparition de problèmes durant toute la durée de la mission.

Vivre de longs mois, isolé de tout, dans un environnement aussi confiné que l'est la station spatiale, ou que ne le serait un vaisseau spatial en direction de Mars, est sujet à de forts risques de problèmes comportementaux qui nuiraient au bon déroulement de la mission.

Les futures astronautes sont choisis entre autres pour leur capacité à résister au stress, à travailler en équipe et à contenir leurs émotions en toute circonstance afin de placer le bien être des autres membres d'équipage et la réussite de la mission au premier plan.

Durant toute la durée de la formation spécifique à la mission, avant le décollage, les futurs membres d'équipage apprennent à se connaître, à vivre et à travailler ensemble. Cela permet de s'assurer que les personnalités des uns et des autres sont compatibles. Ils devront se supporter de longs mois sans retour en arrière possible, il n'y a donc aucune place pour le hasard.

Afin de connaître au mieux les comportements humains en milieux isolés et confinés, des études sont réalisées sur Terre afin d'analyser les réactions psychologiques et sociales des personnes vivant dans un module simulant les conditions de vies d'un voyage aller-retour vers la planète Mars. C'est le cas de la mission HI-SEAS IV (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation), financée par la NASA, dans laquelle un groupe de 3 femmes et 3 hommes, dont un français, Cyprien Verseux, sont restés enfermés durant 1 an de fin aout 2015 à fin aout 2016 dans un Dôme isolé, à Hawaï.

Pour que l'isolement soit moins difficile, un soutien médical régulier en liaison avec la Terre est mis en place. Il permet aux astronautes d'avoir un soutien psychologique et une prise en charge médicale des petits problèmes qui pourraient survenir en cours de mission.

Un soutien familial avec du temps libre afin de communiquer avec leurs proches est indispensable pour les astronautes. Les familles ont également l'occasion d'envoyer des aliments ou des objets à leurs proches en mission sur l'ISS (instruments de musiques, aliments spéciaux) qui ont un apport psychologique considérable.

3.1.2.8 Impesanteur

La contre-mesure la plus efficace serait de recréer les conditions de la pesanteur terrestre. Cela serait possible grâce à un vaisseau spatial soumis à un mouvement de rotation autour d'un axe permettant ainsi de créer une force centrifuge. Une gravité artificielle serait alors produite et pourrait être maintenue à 1G soit la force gravitation à la surface de la Terre. Les nombreuses contraintes et modifications physiologiques liées à l'impesanteur seraient ainsi compensées. En théorie la création d'un vaisseau spatiale permettant une gravité artificielle est possible et de nombreux concepts ont été mis au point. Mais le coût pour la fabrication, la mise en orbite et l'assemblage d'un tel projet est prohibitif. Ces habitacles sont, aujourd'hui encore, réservés à la science-fiction (Figure 28).



Figure 28 : Course sous gravité artificielle (« 2001 l'odyssée de l'espace », 1968)

3.2 Odontologie au cours des missions spatiales

3.2.1 Historique de l'Odontologie Spatiale (Rai et Kaur 2011; Gunepin et al. 2012, 2016)

3.2.1.1 Chronologie

Le concept de Dentisterie Spatiale est apparu en 1957 avec la publication par le General Office de l'US Air Force du premier guide de Médecine Spatiale incluant un chapitre sur l'Odontologie (Air Force Manual 160-13). Il faudra ensuite attendre 1966 pour voir l'affectation d'un chirurgien-dentiste à plein temps à la NASA. Celui-ci, affecté à Houston, avait pour mission la prise en charge bucco-dentaire des astronautes avant les missions spatiales (examens de sélection, prévention, traitements).

Les années 1980 verront l'Odontologie entrer dans le programme des navettes spatiales avec le développement d'instruments dentaires adaptés aux contraintes spatiales et de guides pour la prise en charge bucco-dentaire des astronautes au cours des vols spatiaux.

Début 2000, la conquête spatiale entre dans une nouvelle dimension avec le projet de missions de longue durée pour atteindre la planète Mars. Le Comité de la National Academy of Science Institute of Medicine pour la médecine spatiale se saisit alors de la problématique du maintien de la santé bucco-dentaire des équipages au cours de ces vols de longue durée. Les premières études portant spécifiquement sur l'impact de l'impesanteur sur la sphère bucco-dentaire ont débuté en 2009. Cette année a vu également la création de l'International Association of Aerospace Dentistry (IAAD), une organisation affiliée à l'Aerospace Medical Association (AsMA) et se définissant comme « la voix de la dentisterie au sein de la médecine spatiale ».

Depuis 2010, la Kepler Space University propose une formation en Dentisterie Spatiale pour à la fois sensibiliser les professionnels de l'espace à la problématique de la Dentisterie Spatiale (sélection des équipages, prévention de la survenue de pathologies bucco-dentaires dans l'espace), mais aussi pour promouvoir la recherche en Dentisterie Spatiale peu développée jusqu'à présent dans ce domaine.

3.2.1.2 Urgences dentaires

Concernant les astronautes américains, il n'y a officiellement aucun document écrit relatant la survenue d'une urgence dentaire durant l'ensemble des missions spatiales auxquelles ils ont participé. Cependant, un chirurgien-dentiste de la NASA a décrit le descellement d'une couronne au cours d'une mission spatiale de courte durée et son recèlement à l'aide d'un ciment provisoire par un membre d'équipage avec le matériel présent à bord. Elle a ensuite été scellée définitivement au retour de l'astronaute sur Terre (Menon 2012; Gunepin et al. 2016).

Les cosmonautes russes ont également rapporté des pertes d'obturation dentaires et des descellements de prothèses dus aux vibrations générées par la poussée des moteurs lors de la phase de décollage. L'incident dentaire le plus marquant des missions spatiales est survenu en 1978 durant la mission Saliout 6. Le cosmonaute Yuri Romanenko a été victime d'une douleur dentaire durant les 15 derniers jours de sa mission de 96 jours. La douleur a été telle que le

cosmonaute était dans l'incapacité de réaliser les tâches qui lui étaient révolues jusqu'à son retour sur Terre. Les russes n'avaient alors pas de protocole pour des soins dentaires d'urgence à bord. Les seuls conseils fournis alors par le personnel au sol étaient de faire des bains de bouche et de garder la dent « au chaud » (Gunepin et al. 2013). Ce cas clinique a donc été un tournant pour la prévention et la prise en charge des douleurs dentaires en cours de mission spatiale (Menon 2012; Zimmermann 2013; Gunepin et al. 2016).

En Mars 1995 et juin 1998, des soins dentaires ont dû être réalisés au sein de la station Mir. Des lésions carieuses ont été nettoyées puis obturées avec un matériau d'obturation temporaire disponible dans le kit dentaire de vol. Ces deux cas représentent 1 % de l'ensemble des événements médicaux survenus au cours de la période 1995-1998. De plus, entre le 7 février 1987 et le 9 février 1996, la station spatiale Mir a répertorié 304 cas médicaux dont un seul correspondait à une lésion carieuse (Menon 2012).

Aucun incident bucco-dentaire n'a été signalé au cours de la simulation de mission sur Mars (Mars500[®]) réalisée de juin 2010 à novembre 2011 dans la banlieue de Moscou. Cette étude a consisté à enfermer six « marsonautes » pendant 520 jours à bord d'un ensemble de caissons simulant un vaisseau spatial. Cette durée de 520 jours correspond à la durée d'un voyage aller-retour vers la planète Mars plus 30 jours d'exploration de la planète (Gunepin et al. 2016).

3.2.1.3 Risque d'incident en cas d'allongement de la durée des missions

Au-delà des retours d'expérience des missions spatiales et des simulations, en termes d'événements dentaires, tous les experts s'accordent sur le fait que l'incidence de ces événements augmentera de facto avec l'allongement de la durée des missions spatiales.

Compte tenu du faible nombre de cas répertoriés en cours de missions, il est primordial d'analyser le risque au sein de la population concernée.

Ainsi, depuis la première mission spatiale jusqu'au 23 juillet 2010, l'incidence dans la population des astronautes est de 0,00006 % pour les lésions carieuses, 0,00005% pour les abcès et 0,00013% pour les maladies parodontales (Menon 2012).

Certains problèmes dentaires sont intervenus dans les 90 jours précédant le décollage (pulpites, abcès dentaires, fractures dentaires, descellements de prothèses) et même un cas dans les 15 jours précédant le décollage.

Selon un rapport de la NASA, ces chiffres sont très certainement sous-estimés. En effet, les problèmes dentaires ne sont pas tous systématiquement documentés par les médecins en charge des astronautes et les astronautes eux-mêmes ont tendance à cacher au maximum tous leurs problèmes médicaux, dentaires inclus, risquant de mettre en péril leur sélection pour une mission spatiale.

Ainsi, la NASA a mis en place l'Integrated Medical Model (IMM) qui permet de prévoir la fréquence de survenue de l'ensemble des événements médicaux chez les astronautes. Les fréquences théoriques de survenues d'événements dentaires sont de 0,3 % pour les lésions carieuses, 0,02 % pour les pulpites et 0,005 % pour les descellements de prothèses. On voit donc que l'on est bien supérieur aux données rapportées.

3.2.2 Pathologies bucco-dentaires

Bien que les évènements dentaires ne soient survenus que très rarement au cours des missions spatiales, l'augmentation de la durée des vols spatiaux et les projets voulant envoyer les hommes jusqu'à la Lune, Mars ou au-delà, augmentent la probabilité de voir survenir une urgence dentaire nécessitant un traitement à bord du vaisseau spatial.

Il est donc nécessaire de cibler les différentes pathologies bucco-dentaires pouvant demander une prise en charge par les membres d'équipage.

3.2.2.1 Lésions carieuses

Bien que les astronautes aient peu de chance de développer une lésion carieuse du fait des règles d'hygiène bucco-dentaires strictes qu'ils doivent suivre, la carie dentaire reste l'étiologie la plus commune de douleur dentaire. De plus, malgré les examens cliniques et radiologiques réguliers, certaines lésions carieuses peuvent passer inaperçues sous des restaurations préexistantes et sont difficilement décelables au fond des sillons.

Le type de traitement en vol dépendra de l'étendue de ces lésions. Pour simplifier les procédures et faciliter la formation des astronautes, les lésions carieuses ont été classées en 3 catégories par le Dr Hodapp, dentiste et formateur à la NASA, selon le volume et les structures dentaires touchées (Barratt et al. 2008). Ce classement est simplifié par rapport à la classification Si/Sta (Figure 29) puisqu'il ne prend pas en compte le site de la lésion carieuse et présente moins de stades d'évolution.

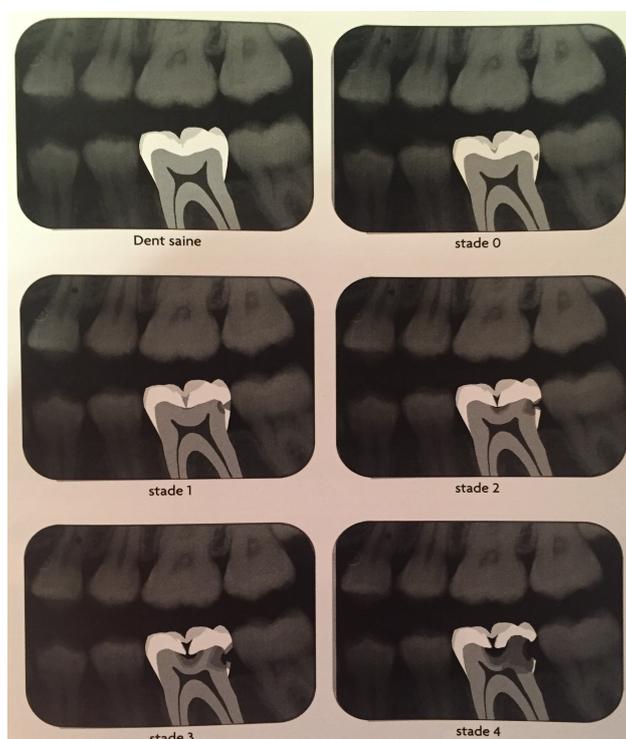


Figure 29 : Représentation schématique des 5 stades d'évolution des lésions carieuses selon le concept Si/Sta (Lasfargues et Colon 2009)

- Caries légères : elles sont asymptomatiques. Elles touchent l'émail et peuvent atteindre une partie superficielle de la dentine. Elles peuvent entraîner un effondrement de l'émail. Elles correspondent aux stades 0 et 1 de la classification Si/Sta.
- Caries modérées : La progression de la lésion carieuse atteint le tiers dentinaire médian. La dent peut être asymptomatique ou présenter une symptomatologie d'hyperhémie pulpaire réversible. Elles correspondent aux stades 2 et 3 de la classification Si/Sta
- Caries avancées : La lésion cavitaire est extensive, parapulpaire et a progressé au point de fragiliser ou détruire une partie des structures cuspidiennes. Le risque de pathologie pulpaire irréversible ou de nécrose pulpaire est alors majoré. Elles correspondent aux stades 3 et 4 de la classification Si/Sta.

3.2.2.2 Traumatismes

Bien que les membres d'équipage vivent en impesanteur, la combinaison de la masse des objets déplacés et de la vitesse associée peut engendrer des chocs et des dommages importants au niveau de la face ou des mâchoires des astronautes. De plus, lors des phases de décollage et d'atterrissage, les chocs et vibrations peuvent provoquer des fêlures ou fractures des dents (Barratt et al. 2008).

- Fractures dentaires : Pour les mêmes raisons de simplification, seuls les trois premiers stades de la classification d'Ellis (Figure 30) sont utilisés pour classer les fractures dentaires (Pagadala et Tadikonda 2015).
 - La classe 1 correspond à une fracture exclusivement amélaire. La perte de l'émail est située le plus souvent au niveau de l'angle mésial ou distal de la dent traumatisée. Bien que la perte de structure soit peu étendue, ces traumatismes ne doivent cependant pas être minimisés, car ils peuvent être associés à un traumatisme des tissus de soutien (Naulin-Ifi 2005). Ces fractures sont asymptomatiques ou légèrement douloureuses à la percussion.
 - La classe 2 correspond à une fracture amélo-dentinaire sans exposition pulpaire. On observe une perte de substance plus ou moins étendue. Ces fractures atteignent en général 1 ou 2 dents. Elles peuvent être associées à une atteinte du ligament parodontal (subluxation ou extrusion). La symptomatologie est proportionnelle à la sévérité du traumatisme et se manifeste par une hyperesthésie dentinaire et une douleur à la mastication (Naulin-Ifi 2005). Ces fractures nécessitent une prise en charge par l'équipage.
 - La classe 3, correspond à une fracture amélo-dentinaire avec exposition pulpaire. L'exposition de la pulpe est facilement objectivée par un saignement au niveau de la fracture. C'est la fracture la plus sérieuse à cause du risque de douleur, de nécrose pulpaire et d'infection qui peuvent en résulter.

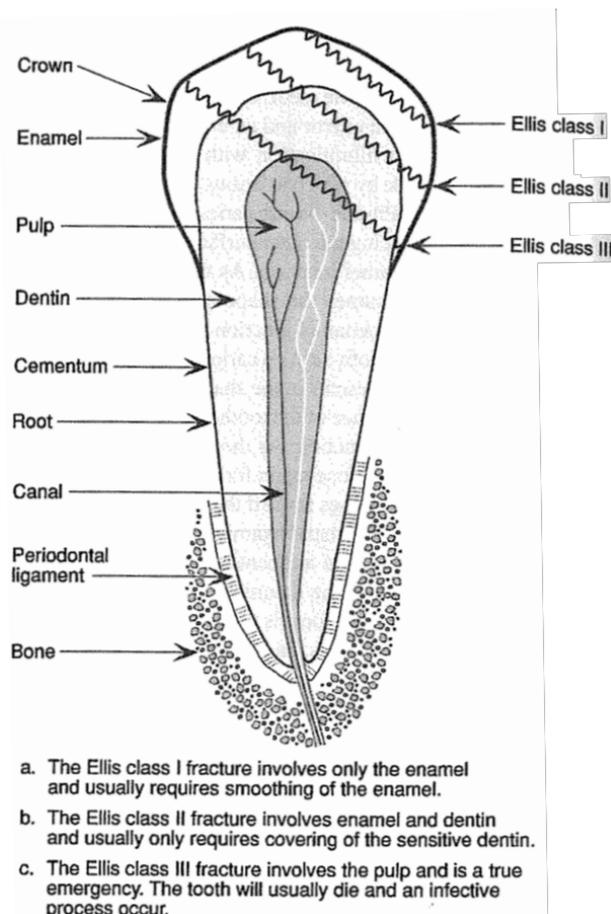


Figure 30 : Schéma des fractures dentaires selon la classification d'Ellis simplifiée pour les astronautes (Barratt et al. 2008)

- **Fêlures** : Les fêlures apparaissent telles des craquelures au niveau de l'émail sans traverser la jonction amélo-dentinaire. Il n'y a pas de perte de substance. Elles sont provoquées par un choc direct sur l'émail, notamment lors des phases de décollage et d'atterrissage, ou suite à un traumatisme. Elles peuvent être totalement asymptomatiques ou bien douloureuses à la mastication. Parfois le patient se plaint d'une légère sensibilité au froid (Naulin-Ifi 2005; Barratt et al. 2008).
- **Subluxation** : Elle correspond à un déplacement de la dent dans son alvéole suite à un traumatisme. Elle peut accompagner une fracture de l'os alvéolaire ou de la dent et nécessite donc une attention toute particulière lors de l'examen par l'astronaute. Elle se caractérise par une mobilité anormale dans le sens vestibulo-lingual par rapport aux dents controlatérales, un petit saignement visible au niveau du sulcus gingival, un test à la percussion émettant un son sourd et pouvant être douloureux et des tests de vitalité pulpaire positifs (Naulin-Ifi 2005). C'est la réponse de la dent au traumatisme qui va guider le traitement. Une petite mobilité ne demande pas de geste particulier, un déplacement plus important peut demander un repositionnement de la dent dans une position favorable à l'occlusion (Barratt et al. 2008).
L'extrusion et la luxation latérale de la dent nécessiteront une prise en charge équivalente à savoir un repositionnement de la dent dans son alvéole de façon à ne pas

interférer avec l'occlusion. Le risque de nécrose pulpaire étant alors majoré, une surveillance particulière devra être mise en place.

- Expulsion : L'expression clinique correspond au déplacement complet de la dent hors de l'alvéole. Il s'agit alors d'une réelle urgence dentaire dont le premier geste sera de localiser la dent expulsée. En impesanteur, elle peut facilement aller se loger dans l'oropharynx. Une fois la dent retrouvée, il faut vérifier l'intégralité de la racine (possibilité d'une fracture radiculaire du tiers apical, le fragment restant dans l'alvéole). Il n'y aura pas de réimplantation possible à bord du vaisseau spatial à cause du risque d'infection pulpaire (Naulin-Ifi 2005; Barratt et al. 2008).

3.2.2.3 Pathologies pulpaires

Afin de faciliter le diagnostic, une classification simplifiée des pathologies pulpaires a été arrêtée par les chirurgiens-dentistes de la NASA (Barratt et al. 2008).

- Dent saine : Une dent est considérée comme saine si elle est asymptomatique, qu'elle répond positivement aux tests de vitalité pulpaire (chaud et froid), et qu'elle n'est pas douloureuse à la percussion et à la palpation. De plus elle ne doit pas montrer de signe de calcification canalaire à la radiographie, d'épaississement du ligament parodontal, ou de résorption radiculaire (interne ou externe). La lamina dura doit être intacte (Barratt et al. 2008).
- Hyperhémie pulpaire, ou inflammation pulpaire réversible : Elle correspond à une inflammation pulpaire superficielle. La dent répond douloureusement à un stimulus thermique. La douleur n'est cependant pas rémanente et s'arrête en même temps que le stimulus. Tout ce qui peut affecter le tissu pulpaire peut entraîner une hyperhémie pulpaire : lésions carieuse, fêlures, abrasions, érosions, attritions, récessions gingivales, bruxisme ou restauration iatrogène. Le traitement de l'étiologie suffit en général à régler le problème.
- Pulpite, ou inflammation pulpaire irréversible : Elle correspond à une inflammation profonde de la pulpe dentaire, sans guérison possible même en cas de traitement de l'étiologie. D'un point de vue symptomatologique, l'intensité de la douleur est nettement supérieure comparée à celle de l'hyperhémie pulpaire. La douleur apparaît par intermittence de façon spontanée. Elle est rémanente et peut être exacerbée par un stimulus thermique (surtout le chaud). Sur Terre, la dent peut être douloureuse en position de décubitus, ce qui n'est pas le cas lors des vols en impesanteur.
- Nécrose pulpaire : Elle correspond à une mortification du tissu pulpaire s'accompagnant de sa destruction. Elle peut être partielle ou totale selon qu'elle intéresse tout ou partie du tissu. La dent peut être asymptomatique comme symptomatique lorsque la nécrose affecte le tissu périapical de la dent. Les tests de vitalités thermiques sont négatifs. Le test de percussion peut rester normal tant que le périapex n'est pas endommagé. La pulpe nécrosée peut être septique et provoquer une inflammation de l'espace périapical.

Le risque d'abcès dentaire est alors majoré. Les conséquences, en l'absence de traitement, peuvent être graves avec une propagation de l'infection dans l'organisme (cellulite, septicémie).

3.2.2.4 Pathologies parodontales (Bercy et al. 1996; Duyninh et al. 2016)

Les pathologies parodontales sont des maladies multifactorielles. Elles touchent les tissus parodontaux (gencive, ligament parodontal, os alvéolaire). Le principal facteur de risque pour les astronautes est la présence de biofilm bactérien.

L'augmentation de la durée des missions associée au risque de diminution de la rigueur dans les soins d'hygiène bucco-dentaire augmentent le risque de pathologies parodontales.

- Syndrome du septum : Il correspond à une inflammation de la gencive et de l'os alvéolaire inter dentaire en regard d'un septum au-dessus duquel persistent des résidus alimentaires. La symptomatologie se caractérise par une douleur à la pression sur les dents controlatérales, un saignement et un œdème de la gencive en regard. En cas de persistance du problème, une destruction de l'os alvéolaire inter dentaire peut survenir.
- Gingivite induite par la présence de biofilm : L'absence de contrôle de plaque entraîne rapidement l'apparition d'une inflammation. La gencive devient rouge, œdémateuse et sensible. On note un saignement spontané ou provoqué au sondage. Aucune perte d'attache n'est relevée et l'examen radiographique ne montre aucune atteinte osseuse. Seul le parodonte superficiel est affecté.
- Parodontite : C'est une maladie infectieuse inflammatoire d'origine bactérienne provoquant une perte d'attache et une alvéolyse, suivies de la formation d'une poche parodontale. Le biofilm bactérien reste la principale étiologie (Duyninh et al. 2016). Les conséquences sont l'apparition de mobilité plus ou moins importantes des dents en fonction de la gravité de la pathologie, et un risque de chute de la dent proportionnel à la perte du niveau osseux.
- Abcès parodontaux : Ils se caractérisent cliniquement par un œdème de la gencive qui devient rouge et lisse. La dent est mobile et douloureuse à la pression. Une suppuration est souvent associée et le patient peut souffrir d'une adénopathie associée à de la fièvre.

3.2.2.5 Autres urgences dentaires

D'autres pathologies sont à prendre en considération car pouvant nuire au bon déroulement de la mission.

Les barodontalgies, fréquentes chez le personnel navigant (aviation civile ou militaire) se caractérisent par des douleurs au niveau des sinus pouvant se projeter sur les dents. Elles peuvent survenir lors d'un changement important de la pression, notamment durant les phases de décollage et d'atterrissage.

Le phénomène d'ostéoporose généralisé à cause de la vie en impesanteur entraînant une diminution de la densité osseuse augmente le risque de fracture de la mandibule et des os de la face en cas de choc.

Il existe aussi un risque de formation de lithiases au niveau des canaux excréteurs des glandes salivaires, à l'instar de ce que l'on observe au niveau rénal. Le risque de complication infectieuse est alors à prendre en compte (sialodochite, abcès pelvibuccal, sialadénite) (Chossegros et al. 2016).

Le stress et les perturbations immunologiques peuvent entraîner un retard dans la cicatrisation des plaies de la bouche.

En cas de vol spatial de plus longue durée comme pour un voyage vers Mars, la dose de radiations reçues par l'équipage et la durée d'exposition seront augmentées. Le risque de formation d'une tumeur cancéreuse de la cavité buccale se trouverait alors également majoré (Hassler et al. 2014).

3.2.3 Mesures préventives mises en place

La prévention est la mesure la plus efficace pour anticiper la plupart des pathologies dentaires. Sa mise en place s'est intensifiée depuis le cas du cosmonaute russe Yuri Romanenko en 1978. Pour être sûr qu'aucune pathologie au niveau dentaire ne survienne durant une mission spatiale, il faut en premier lieu que les astronautes aient une denture en parfait état.

3.2.3.1 Critères d'exclusion

Lors de la sélection des futurs astronautes, les critères d'exclusion dus à un problème dentaire sont nombreux. Ils ont été validés par les agences spatiales participant au programme de station spatiale internationale (NASA, ESA, Agences spatiales russe, canadienne et japonaise) dans un document dont la dernière version date de 2014. Ce document définit les standards médicaux pour les membres d'équipages de la Station Spatiale Internationale. Seront donc exclus du programme spatial les astronautes présentant au moins un des problèmes suivants :

- Tout défaut dentaire perturbant une élocution claire.
- Un édentement complet maxillaire ou mandibulaire ou un nombre insuffisant de dents saines naturelles permettant la mastication d'un régime alimentaire normale ou une élocution claire.
- Une prothèse dentaire amovible qui, en cas de perte ou de fracture, ne laisserait pas suffisamment de dent saine naturelle pour mastiquer ou parler clairement.
- Une prothèse dentaire amovible unilatérale risquant d'être avalée.
- Pathologies ou anomalies des mâchoires ou des structures associées, incluant les problèmes parodontaux, ne pouvant pas être corrigés facilement, ou qui puissent interférer avec les obligations de performance.
- Problèmes de malocclusion sévère perturbant la mastication d'un régime alimentaire normal ou une élocution claire.

- Toute lésion dentaire telle que les lésions carieuses, les dysplasies dentinaire ou amélaire, les fêlures dentaires symptomatiques, les restaurations coronaires inadaptées, les prothèses inadaptées et les défauts au niveau implantaires jusqu'à leur correction.
- Les troisièmes molaires incluses ou partiellement incluses pouvant potentiellement provoquer une résorption de la deuxième molaire adjacente, une péri coronarite ou un problème parodontal jusqu'à son traitement complet.
- Les infections d'origine endodontique ou parodontale jusqu'à leurs traitements.
- Un traitement orthodontique actif.

(NASA et al. 2014)

En complément de cette sélection, les astronautes ont une visite de contrôle annuelle obligatoire et la dernière doit avoir lieu au moins 6 mois avant le début de la mission. Les astronautes doivent se trouver en classe 1 ou 2 des catégories décrites précédemment pour prétendre à une mission spatiale. Seuls les astronautes en classe 1 à la dernière visite de contrôle pourront partir. Tous les soins dentaires doivent avoir été réalisés au moins 90 jours avant le décollage. Au cours de la dernière consultation chez leur dentiste, les astronautes réalisent un détartrage et la pose d'un verni fluoré pour prévenir l'apparition de lésions carieuses.

En plus de ces soins préventifs, les astronautes doivent suivre des règles d'hygiène bucco-dentaires très strictes. Ils sont, de surcroît, particulièrement bien sensibilisés aux risques de pathologies bucco-dentaires et à l'importance du respect de ces règles.

Les femmes et les hommes sélectionnés pour être envoyés dans l'espace sont donc en parfaite santé. Leur état bucco-dentaire ne comporte aucune pathologie sous-jacente et aucun risque n'est pris à ce niveau-là.

Cette prévention a porté ses fruits jusqu'à présent puisque très peu de cas de problèmes dentaires en cours de mission ont été rapportés et pour la plupart, des traitements par antalgiques ont été suffisants.

3.2.3.2 Limites

Cependant, ces mesures de préventions présentent des limites.

Les médecins des agences spatiales ne sont pas à l'abri de fausses informations ou d'informations masquées par les astronautes qui peuvent craindre pour leur accréditation à une future mission spatiale. Une relation de confiance forte est donc primordiale pour limiter la survenue de problèmes au niveau dentaire, ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui.

Malgré les examens cliniques et radiologiques de qualité réalisés sur les astronautes, certaines lésions carieuses précoces peuvent passer inaperçues et se développer en cours de mission, notamment à cause des modifications au niveau immunologique et salivaire dans le contexte du voyage spatial.

De plus, une fois à bord de leur vaisseau spatial, les membres d'équipage sont livrés à eux même et ne respectent pas forcément les recommandations, surtout en ce qui concerne le planning des journées et le temps consacré à la prise des repas. Pris par le temps et la réalisation des expériences scientifiques, les astronautes ont tendance à fractionner la prise des repas et à augmenter le grignotage. La texture et les propriétés nutritives des aliments élaborés pour les

vols spatiaux ne prennent pas en compte le risque carieux. La probabilité de voir se développer une lésion carieuse est de fait augmentée.

Enfin, le stress, l'isolement, le confinement et la monotonie que représentent les missions spatiales de longue durée augmentent le risque de négligence de l'hygiène buccale.

L'allongement de la durée des missions spatiales augmente donc significativement le risque de survenue d'un incident dentaire. La simple prévention est donc nécessaire mais pas suffisante pour lutter contre les pathologies dentaires à bord des vaisseaux spatiaux. La possibilité pour les membres d'équipage de réaliser eux même les soins d'urgences en cours de mission est donc primordiale. Cela passe alors par une formation adéquate et du matériel approprié en quantité suffisante pour pallier à tous les problèmes possibles.

3.2.4 Effets des vols spatiaux de longue durée sur la sphère oro-faciale

A l'instar du reste de l'organisme, la sphère oro-faciale subit des contraintes liées à l'environnement spatial. De plus, les modifications physiologiques de l'organisme décrites précédemment peuvent aussi avoir des conséquences au niveau bucco-dentaire.

La vie en impesanteur, dans l'environnement confiné que représente le vaisseau spatial joue sur la physiologie de l'organisme. Les problèmes d'ostéoporose et de redistribution des fluides corporels vers le haut du corps ont des répercussions au niveau de la sphère buccale.

L'idée générale est que le risque de survenue d'une pathologie bucco-dentaire augmente durant une mission spatiale, à fortiori avec l'allongement de la durée des missions. De nombreuses études ont donc été réalisées afin de confirmer ou d'infirmer cette idée.

3.2.4.1 Structure osseuse

Partant du constat que la microgravité entraîne une diminution de la fonction des ostéoblastes et provoque une résorption osseuse et une diminution de la densité osseuse, une équipe de chercheurs a voulu mettre en évidence les conséquences d'un séjour de 6 mois dans l'espace sur le niveau osseux péri-implantaire. La mesure a été réalisée par deux évaluateurs indépendants sur un spationaute français porteur d'un implant en regard de la première molaire mandibulaire droite. Aucune différence significative n'a été observée chez ce premier patient sur le niveau osseux péri-implantaire après 6 mois passés en impesanteur (Haigneré et al. 2006).

3.2.4.2 Flore buccale

L'altération du système immunitaire au cours des vols spatiaux induit des changements au niveau de la composition de la flore buccale et une augmentation de la formation du biofilm bactérien (Cervantes et Hong 2016).

3.2.4.2.1 Modifications quantitatives (Brown et al. 1974; Ilyin 2005; Orsini et al. 2017)

Dès 1974, une étude américaine a cherché à mettre en évidence un changement de la flore buccale dans le contexte d'un voyage spatial. Ce travail a simulé, sur Terre, une mission à bord de la station américaine Skylab. Un groupe de 3 astronautes, hommes, âgés de 33, 35 et 43 ans ont été sélectionnés et placés dans une chambre confinée à atmosphère contrôlée (70% d'oxygène et 30% d'azote) pendant 56 jours. A partir de 30 jours avant le confinement et jusqu'à 18 jours après leur sortie, ils ont été soumis au même régime alimentaire que les astronautes lors d'une mission spatiale, à savoir une alimentation riche en glucides et faible en matières grasses. Les astronautes ont dû également se soumettre à des règles d'hygiène bucco-dentaire strictes : un brossage biquotidien de deux minutes et le passage du fil dentaire une fois par jour. Ils devaient utiliser une brosse à dent multi-touffes en nylon avec un dentifrice pouvant être avalé sans conséquence grave, sans rinçage. Les bains de bouche, applications topiques de fluorures ou autre médication étaient interdits.

De tous les critères spécifiques aux vols spatiaux, seule l'impesanteur n'a pas été recréée.

Les données analysées montrent une augmentation des *Streptococcus mutans*, que l'on sait directement impliqués dans la maladie carieuse, et des mycoplasmes. On note également une diminution du flux salivaire et une augmentation des IgA sécrétoires et des lysozymes salivaires.

L'augmentation des mycoplasmes est inexplicée et son influence sur la santé orale est aujourd'hui inconnue.

Le fort taux de *Streptococcus mutans* dans le biofilm bactérien est observé une semaine avant de rentrer dans la chambre de confinement et jusqu'à trois semaines après. Cela montre que l'augmentation de cet organisme cariogène est liée au régime alimentaire des astronautes.

La baisse du flux salivaire est probablement liée au stress ou tout autre facteur influençant la physiologie de l'organisme.

L'élévation du niveau d'IgA sécrétoire et de lysozyme salivaire est supposée répondre à des agents microbiologiques d'origine endogène ou environnementale.

En 2005, une étude reprenant les données enregistrées au cours des missions spatiales russes à bord de Salyut et de Mir, montre une augmentation quantitative des bactéries pathogènes opportunistes dans le système digestif, incluant la région buccale.

En 2017, une expérience sur des cultures de *Streptococcus mutans* en microgravité a montré que la croissance de cette bactérie n'était pas significativement différente en microgravité et en gravité normale. Cependant, des différences ont également été remarquées sur le plan qualitatif.

3.2.4.2.2 Modifications qualitatives (Cheng et al. 2014; Orsini et al. 2017)

En 2014, une équipe de chercheurs chinois a analysé des cultures de *Streptococcus mutans* et *Streptococcus sanguinis* dans des conditions de microgravité simulée (μg^*) grâce à une technologie de superconduction magnétique, en comparaison avec des cultures sous gravité terrestre artificielle ($1g^*$) utilisant le même procédé et des cultures sous gravité terrestre naturelle ($1g$). L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet de la microgravité sur la physiologie des *Streptococcus mutans* et sur la structure du biofilm bactérien.

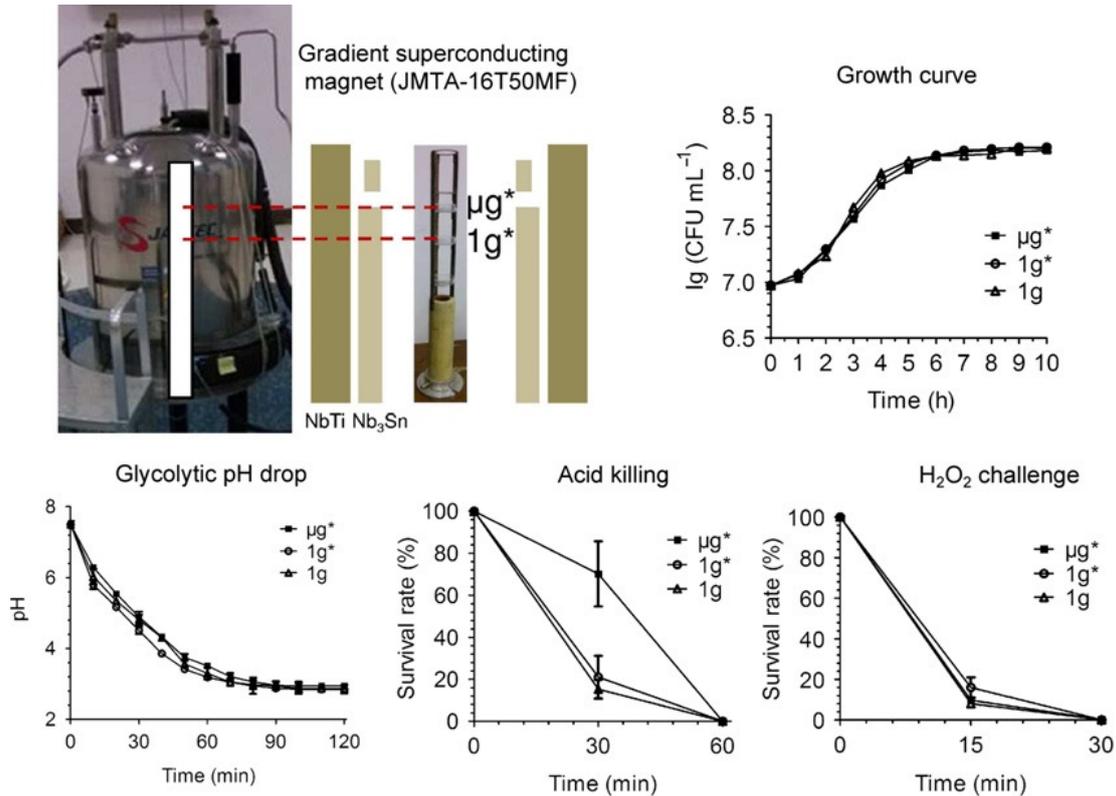


Figure 31 : Croissance et résistance des *Streptococcus mutans* (Cheng et al. 2014)

Au niveau de la croissance des *Streptococcus mutans*, aucune différence significative n'a été observée entre la culture sous microgravité artificielle et la culture sous gravité terrestre artificielle, de même, la variation de pH entre le début de la culture et la fin évolue de façon équivalente pour les 3 types de cultures bactériennes, en témoignent la superposition des courbes (Figure 31). Par contre la culture de *Streptococcus mutans* sous microgravité artificielle a montré une survie significativement supérieure face à un traitement à l'acide (pH 2,8) par rapport aux cultures sous gravité terrestre ($p < 0,05$) (Figure 31). Cela montre que la résistance de cette souche bactérienne augmente dans les conditions de microgravité.

Pour ce qui est de la structure et des caractéristiques de la membrane bactérienne ainsi que la morphologie cellulaire chez *Streptococcus mutans*, les résultats ne montrent pas de différence significative selon les différentes pesanteurs étudiées.

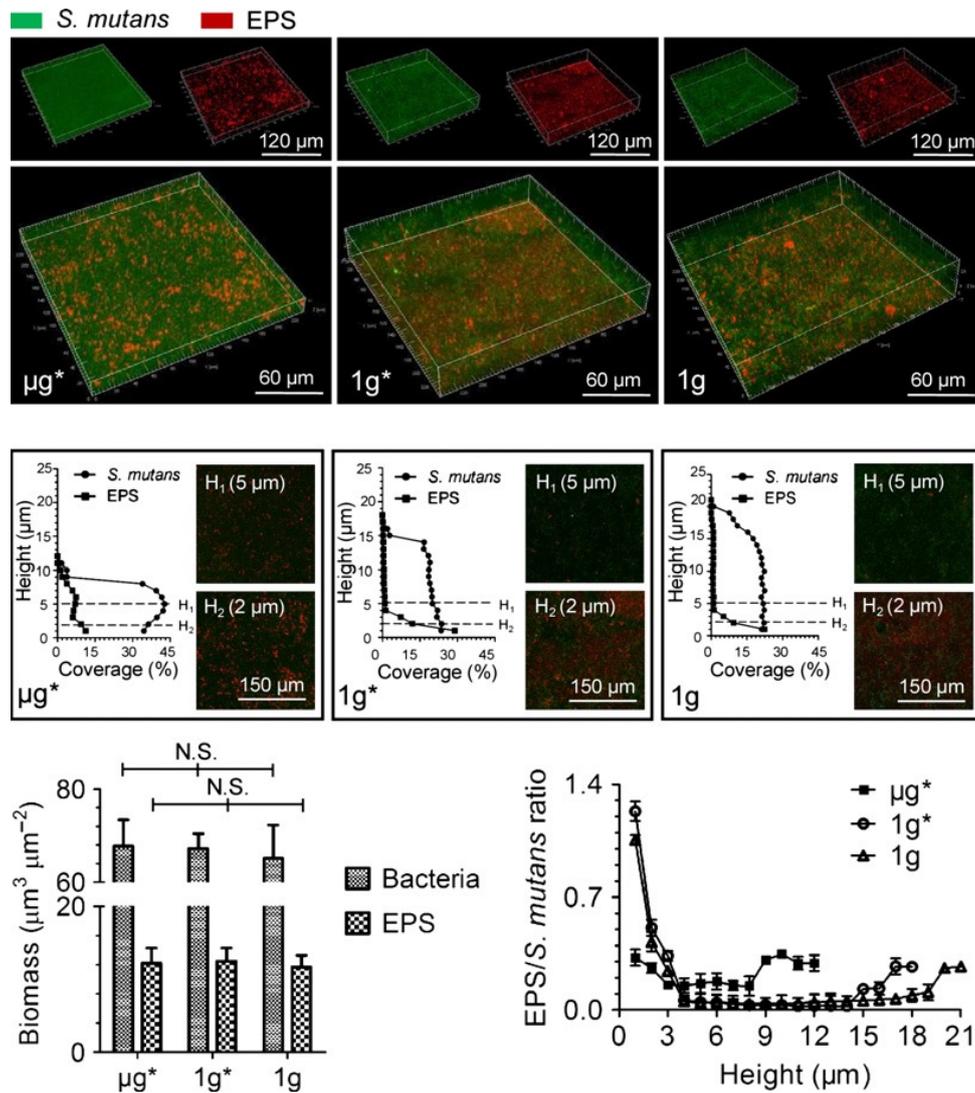


Figure 32 : Structure du biofilm (Cheng et al. 2014)

Au niveau de la structure du biofilm bactérien, les cultures sous différentes gravités ne montrent pas de différence, ni dans la capacité des *Streptococcus mutans* à produire des polysaccharides extracellulaires servant de substrat au biofilm, ni dans la quantité globale de bactéries. Cependant, le biofilm formé sous μg^* est plus fin et plus dense que celui formé sous $1g^*$ et $1g$. De plus, l'architecture et la composition du biofilm formé sous μg^* est anormale avec une distribution des polysaccharides sur toute la hauteur du biofilm et non uniquement au bas du biofilm sous $1g$ et $1g^*$. Le ratio polysaccharides/*Streptococcus mutans* est significativement supérieur à hauteur intermédiaire du biofilm et significativement inférieur au bas du biofilm pour la culture sous μg^* comparé aux cultures sous $1g^*$ et $1g$ ($p < 0,05$) (Figure 32).

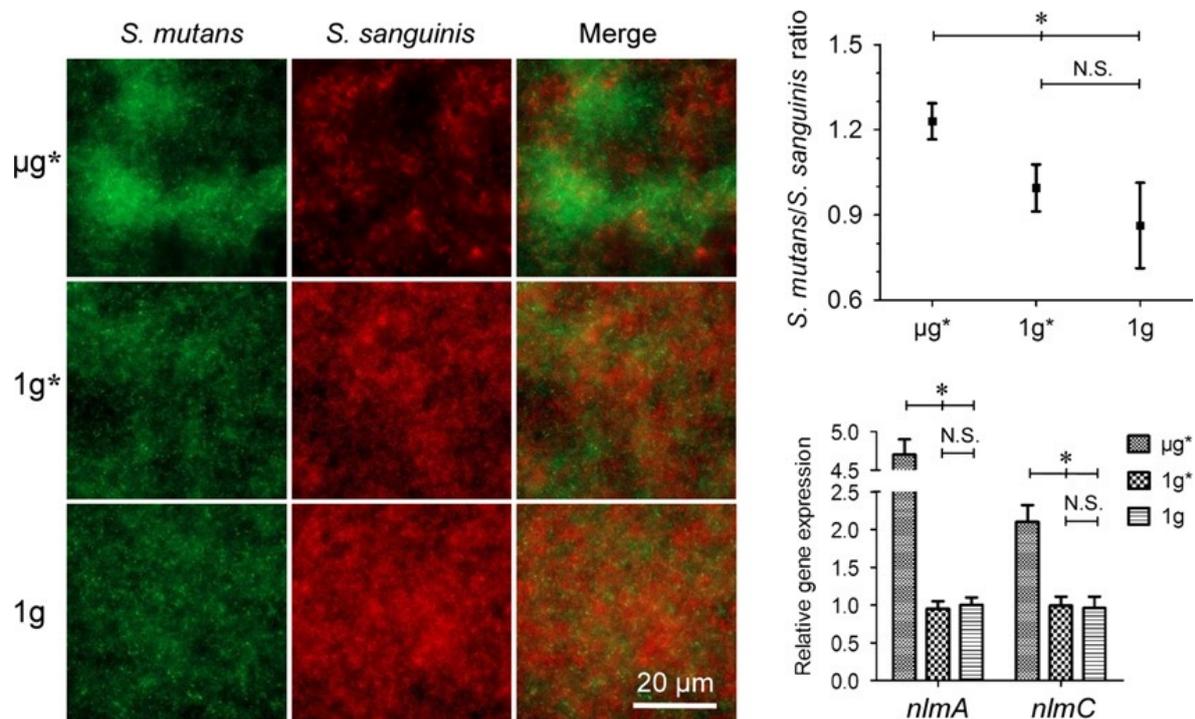


Figure 33 : Equilibre microbiologique (Cheng et al. 2014)

D'un point de vue de l'équilibre microbiologique du biofilm bactérien, les résultats montrent un développement plus important pour *Streptococcus mutans* face à *Streptococcus sanguinis* pour les cultures sous μg^* comparativement aux cultures sous 1g^* et 1g avec un ratio *Streptococcus mutans*/*Streptococcus sanguinis* significativement augmenté ($p < 0,05$).

L'expression des gènes est également significativement différente pour les *Streptococcus mutans* cultivés sous μg^* ($p < 0,05$). Ainsi, l'expression du gène codant pour la mutacine, un peptide permettant d'inhiber le développement des autres streptocoques buccaux (nlmA et nlmC sur le diagramme) par *Streptococcus mutans* est plus stimulée sous μg^* que sous 1g^* et 1g (Figure 33).

En 2017, l'analyse macroscopique de l'agglomération des *Streptococcus mutans* en microgravité a montré une différence par rapport à la culture sous gravité normale. En effet, les bactéries sous microgravité ont formé des structures plus compactes que celles sous gravité normale.

L'étude de 1974 montre le rôle direct du régime alimentaire sur l'augmentation des *Streptococcus mutans* dans le biofilm des astronautes.

L'étude de 2014 met en évidence une résistance accrue des *Streptococcus mutans* en microgravité ainsi qu'une augmentation quantitative de cette bactérie au sein du biofilm.

Compte tenu du fort potentiel cariogène de *Streptococcus mutans*, l'augmentation du risque carieux doit être prise en compte pour les missions spatiales de longue durée.

3.2.4.3 Parodonte

En 2013, une étude a recherché les conséquences possibles d'un séjour sur Mars sur l'état parodontal des astronautes. Cette étude a consisté à isoler aux Etats-Unis, durant deux semaines, un groupe de 12 hommes en bonne santé bucco-dentaire au MDRS (Mars Desert Research Station), dans un environnement confiné simulant la vie sur la planète Mars. Les chercheurs ont réalisé des tests salivaires pour connaître l'état de stress des volontaires. Ils ont analysé le flux salivaire, le taux de cortisol, d' α -amylase et d'immunoglobuline ainsi que le niveau de microorganismes présents dans la salive et la plaque dentaire. Pour l'état parodontal des participants, un examen clinique est réalisé avant l'expérience, à une semaine et à deux semaines. Il comporte un sondage des poches parodontales, une mesure du saignement au sondage et de la perte d'attache.

L'alimentation des sujets a été contrôlée avec une consommation moyenne journalière de 2400 kcal comprenant 1200 mg de calcium. L'emploi de dentifrice et de bain de bouche n'étant pas autorisé durant l'expérience, l'hygiène buccale a consisté à se brosser les dents deux fois par jour avec du bicarbonate de sodium suivi d'un simple rinçage à l'eau.

Les résultats montrent une augmentation significative des profondeurs des poches passant de 2,1 mm au début de l'expérience à 3,1 mm en une semaine et 3,6 mm en deux semaines. La perte d'attache passe elle de 1,6 mm à 3,1 mm à la fin de l'expérience. Une augmentation du saignement au sondage est observée, l'indice de saignement passant de 4,32% à 42,3% en 2 semaines ($p < 0,05$). Cela met en évidence une inflammation de la gencive des sujets vivant dans les conditions d'isolement que présenterait un séjour sur Mars.

Le taux de microorganismes dans la salive et la plaque dentaire a évolué au cours de l'expérience. Le taux de bactéries anaérobies (*Bacteroides*, *Fusobacterium* et *Veillonella*) a augmenté en 1 semaine puis s'est stabilisé. Celui des microorganismes aérobies (*Neisseria*, *Lactobacille*, *Staphylocoque*, *Candida* et *Bacille entérique*), a augmenté en une semaine, puis est revenu à sa valeur initiale. Le taux de *Streptococcus mutans* a lui significativement augmenté durant les deux semaines de l'expérience ($p < 0,001$).

Concernant les marqueurs de stress, les taux d' α -amylase, de cortisol salivaire et du score CST (Current Stress Test) augmentent significativement ($p < 0,05$).

Le taux d'immunoglobulines (IgA, IgM et IgG) salivaires diminue entre le début et la fin de l'expérience, ainsi que le flux salivaire ($p < 0,001$).

Durant l'expérience, la santé parodontale des membres du groupe s'est dégradée. Le stress et l'utilisation de bicarbonate de sodium peuvent en être responsables. On sait que le stress peut perturber l'immunité et est un facteur aggravant de la maladie parodontale, en témoignent la baisse du niveau d'immunoglobuline et du flux salivaire et l'augmentation de l'activité bactérienne. Le stress, omniprésent au cours des missions spatiales est aussi dû au confinement du groupe (Rai et Kaur 2013).

3.2.4.4 Glandes salivaires

En 2014, une étude s'est intéressée aux modifications des propriétés salivaires lors d'un séjour en impesanteur de souris femelles. Les résultats montrent une morphologie des acini de la glande parotide inchangée, mais des modifications de la spécificité des cellules, notamment une augmentation des vacuoles autophagiques au sein des cellules acineuses et une augmentation des cellules apoptotiques. Les conséquences sont une diminution du flux salivaire. Or la salive permet de tamponner le pH de la cavité buccale après les repas et a une action immunologique par la sécrétion d'IgA. Elle joue ainsi un rôle protecteur dans la maladie carieuse. Les modifications au niveau de ces cellules sont équivalentes à celles observées chez les rats diabétiques.

Une altération de l'expression de nombreuses protéines salivaires a été observée, telles que l' α -amylase, les IgA ou les protéines PRP (Protéines Riches en Proline) ($p < 0,003$).

L'altération de l'expression des protéines tissulaires en impesanteur associée à l'absence de lésion tissulaire suppose que les modifications observées sont liées à une réponse homéostatique de l'organisme face à son nouvel environnement. Il serait important de déterminer si les valeurs mesurées reviennent au niveau du groupe contrôle après un retour sur Terre (Mednieks et al. 2014).

3.2.4.5 Impesanteur

Une expérience menée sur des humains en microgravité simulée par un alitement incliné de 6°, les pieds placés plus haut que la tête a permis d'analyser les répercussions au niveau buccal d'un séjour en impesanteur.

Les résultats obtenus montrent des modifications au niveau salivaire. Une nette diminution du flux salivaire ($p < 0,01$), une augmentation des taux de sodium ($p < 0,01$), potassium ($p < 0,05$), calcium ($p < 0,01$) et protéines ($p < 0,05$) et une diminution de l'activité de l'amylase salivaire ($P < 0,001$) et des taux de vitamines C et E ont été observées ($P < 0,05$).

A la fin de l'expérience de 6 semaines, une diminution de l'amplitude d'ouverture buccale avec une très légère douleur lors des mouvements de la langue et de la mandibule a été remarquée. Ces symptômes peuvent s'expliquer par la migration des fluides corporelles vers la tête, laissant espérer une réversibilité des symptômes au retour à la pesanteur terrestre normale (Rai et al. 2011).

4. Prise en charge odontologique au cours des vols spatiaux

4.1 Formation médicale de l'équipage

La plupart des astronautes ont une formation initiale de pilotage ou en recherche scientifique. Très peu ont suivi un cursus médical initial. Il n'y a jamais eu et il est extrêmement peu probable qu'il y ait dans un avenir proche un chirurgien-dentiste dans un équipage spatial. De même la présence d'un médecin au sein des équipages n'est pas systématique. Une formation médicale et chirurgicale de certains membres d'équipage est donc primordiale avant toute mission spatiale, surtout si la durée est augmentée.

4.1.1 Formation médicale générale

Lors de chaque mission spatiale, deux astronautes sont désignés CMO. Ils suivent une formation médicale de 40 à 70 heures au cours des 18 mois précédant la mission (Gunepin et al. 2016). Dans le cadre des accords internationaux, cette formation se déroule au sein de plusieurs agences spatiales. Ainsi les astronautes européens devront suivre une partie de cette formation au sein de la NASA aux Etats-Unis et une autre partie au centre européen des astronautes à Cologne en Allemagne.

Cette formation suit un certain nombre de règles qui définissent les priorités d'enseignements pour les CMOs.

- Les missions sont de courte durée (rarement plus de 6 mois à bord de l'ISS), donc la capacité à réaliser des soins complexes n'est pas une priorité.
- Du fait de la proximité de la Terre, si l'astronaute ne peut pas être soigné au sein de la station spatiale, son état médical est stabilisé et il est renvoyé sur Terre pour la suite des soins.
- Le recours fréquent de la télémédecine en temps réel est rendu possible grâce à la proximité entre la Terre et l'ISS.

(Gunepin et al. 2013)

L'objectif n'est pas de faire des astronautes des médecins, mais plutôt des secouristes capables de traiter un large éventail de soins d'urgence allant de la suture d'une plaie à l'extraction d'une dent (ESA 2015b).

La formation basique est composée de 20 heures de cours théoriques et de 20 heures de travaux pratiques. Au cours de ces travaux pratiques, les astronautes réalisent des simulations de soins sur des mannequins et peuvent éventuellement faire quelques gestes sur les formateurs (prélèvement sanguin, contrôle de la pression artérielle, échographie).

A l'issue de cette formation, un stage dans un service d'urgences est réalisé par les futurs CMO. Les astronautes suivent ce stage de façon active ou passive selon leur désir. Il n'y a aucune obligation de soins. Ce stage dure habituellement 15 jours, mais selon les contraintes d'emploi du temps des astronautes, il n'est que rarement fait dans son intégralité.

Toute la formation porte sur des problèmes médicaux pouvant survenir en cours de mission. Ils ont été définis selon des calculs de probabilité, de risque, grâce à des études réalisées au préalable sur Terre et peuvent s'enrichir de problèmes rapportés des missions spatiales antérieures.

A partir de ces risques, un ensemble de soins spécifiques à chaque situation a été consigné dans un document, le Medical Checklist (Figure 34). Chaque acte y est détaillé précisément étape par étape avec l'aide de schémas afin que le CMO devant réaliser les soins à bord n'ait qu'à suivre les instructions. Toutes les instructions sont écrites en anglais et en russe et chaque nom de médicament a son équivalent dans les deux langues (NASA 2001).

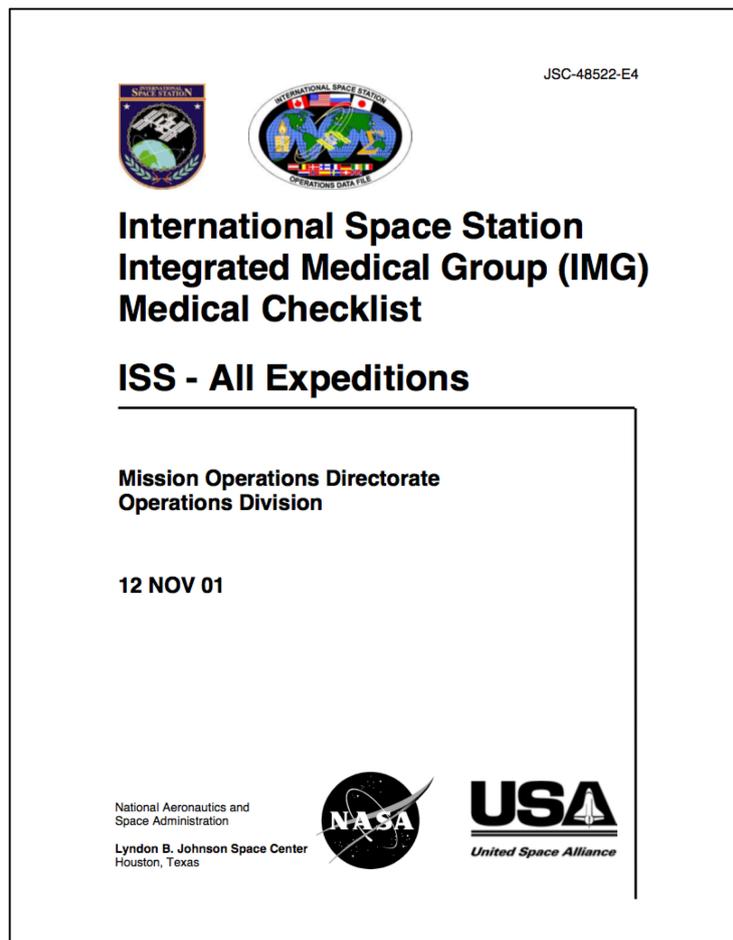


Figure 34 : Couverture du Medical Checklist présent à bord de l'ISS en 2001 (NASA 2001)

C'est sur la base de ce Medical Checklist qu'est réalisée la formation. L'objectif est que les CMO soient en mesure de diagnostiquer la pathologie et de suivre les recommandations de soins. Les CMO ont un examen supplémentaire sous forme de QCM portant exclusivement sur ce document, ce qui n'est pas le cas de autres membres d'équipage.

4.1.2 Formation aux soins dentaires

La formation spécifique aux soins dentaires est encore plus succincte. Elle ne dure que 1h30. Elle se résume en une partie théorique de rappels anatomiques de la région buccale et des dents,

et une partie plus pratique sur les différents soins dentaires envisageables à bord de la station spatiale (Figure 35) (ESA 2015a).



Figure 35 : Un astronaute s'entraîne à l'extraction d'une dent sur un fantôme (nasa.gov)

La partie pratique n'est pas systématique et ne couvre que certains soins parmi ceux réalisables à bord. Comme pour la formation médicale générale, la formation aux soins dentaires dépend des actes consignés dans le Medical Checklist. Pour les pathologies bucco-dentaires, 7 urgences sont décrites et doivent pouvoir être réalisées à bord par les CMO :

- Rescellement de couronne
- Exposition pulpaire
- Techniques d'anesthésie au maxillaire et à la mandibule (Figure 36)
- Obturation temporaire de cavités
- Extraction de dent
- Douleurs dentaires : évaluation de la symptomatologie, traitement d'un abcès dentaire, traitement d'une pulpite et maintien à un niveau de douleur faible à modéré, traitement d'une fêlure.
- Expulsion/Chute de dent

La formation médicale et dentaire est faite pour permettre aux membres d'équipage d'être à l'aise dans l'exploitation du Medical Checklist disponible à bord.



Figure 36 : Photos et schéma des techniques d'anesthésie dans le Medical Checklist (NASA 2008a)

Ce document est là pour aider les CMO en cas de besoin. Ayant eu une formation médicale succincte et un entraînement insuffisant, la nécessité de réaliser des soins en urgence peut vite devenir anxiogène. Les explications détaillées et les schémas leur permettent de suivre les protocoles étape par étape. Est détaillé par exemple le système de montage d'une seringue d'anesthésie (Figure 37) (NASA 2008a).

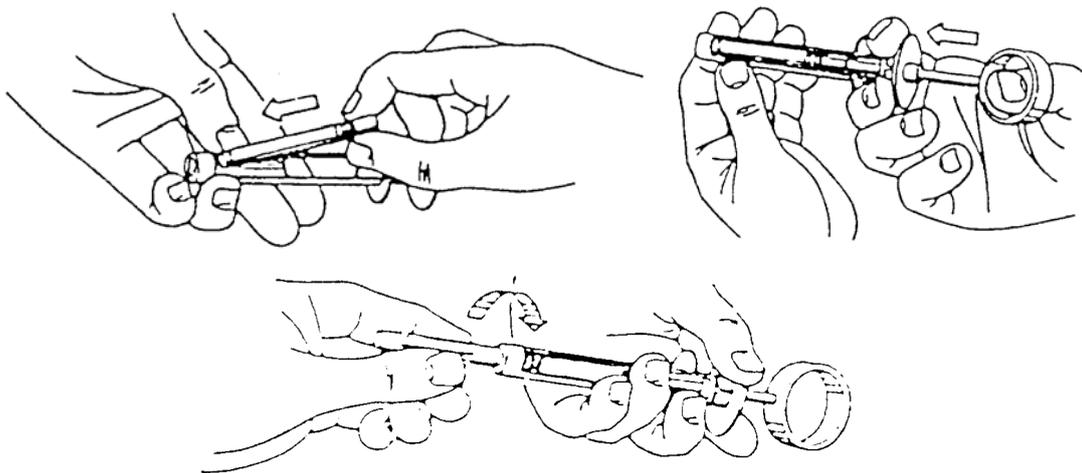


Figure 37 : Schémas du montage d'une seringue d'anesthésie dans le Medical Checklist (NASA 2008a)

4.2 Limites des équipements présents à bord

Le matériel et l'instrumentation disponibles à bord ont été sélectionnés pour la réalisation des soins décrits dans le Medical Checklist et uniquement pour cela. L'objectif lors de la conception du kit médical est d'embarquer le minimum indispensable afin d'éviter un encombrement, la place disponible étant limitée. De plus, plus la quantité et le nombre de références d'instruments sera importante, plus les actes de soins seront complexes et donc difficilement réalisables par des astronautes insuffisamment formés.

Le matériel dentaire embarqué est donc restreint. L'ensemble de l'instrumentation et du consommable tient dans une petite trousse de 15cmx20cm (Figure 38) (NASA 2008b).



Figure 38 : Trousse de soins dentaire en haut à droite sur la photo (NASA 2008b)

On y trouve :

- Un miroir
- Un excavateur
- Une seringue d'anesthésie avec des aiguilles longues et courtes
- Des cartouches d'anesthésies contenant de la lidocaïne associée à de l'épinéphrine
- Du papier à articuler
- Des daviers
- Des élévateurs
- Une sonde droite
- Du ciment provisoire (base et catalyseur)
- Un kit pour douleurs dentaires (eugénol)
- Un matériau d'obturation provisoire
- Du fil dentaire

Les instruments étant réutilisables, un ozoneur est présent à bord de la station spatiale pour permettre leur stérilisation (Cogoli 2008; NASA 2008b; Harman et al. 2012; Gunepin et al. 2016).

Cette faible diversité d'instruments limite la variété de soins possibles. Aucune instrumentation rotative n'est présente à bord. En cas de lésion carieuse, la seule possibilité offerte aux astronautes est une éviction manuelle de la lésion avec l'excavateur et l'obturation provisoire de la cavité. On comprend que cela peut être suffisant pour des missions allant jusqu'à 6 mois comme c'est le cas aujourd'hui, mais cela peut devenir très problématique dans l'optique d'une mission habitée vers Mars pouvant durer un an et demi à deux ans. Le risque de pulpite ou de nécrose serait alors trop important et on ne peut pas envisager l'extraction comme unique solution. En plus des soins, le matériel devra permettre de réaliser un détartrage tous les 6 mois à chaque membre d'équipage en plus d'un examen bucco-dentaire.

4.3 Contraintes liées à l'environnement spatial

4.3.1 Contraintes physiques

Selon la troisième loi de Newton « pour chaque action, il existe une réaction de force égale et de sens opposé ». Cette loi a une valeur spéciale dans l'espace à cause de l'absence de pesanteur. Une simple anesthésie dentaire entraînerait la propulsion du CMO et de l'astronaute soigné d'un bout à l'autre du module dans lequel ils se trouvent. La réalisation d'un massage cardiaque devient alors très compliquée. Le simple fait que les instruments « flottent » dans le vaisseau augmente le risque de blessure ou d'inhalation. Des procédures précises de réalisations de soins devront être respectées (Figure 39). Des mesures appropriées doivent donc être prises (Zimmermann 2013; Gunepin et al. 2016).



Figure 39 : Examen bucco-dentaire de l'astronaute Charles Conrad Jr par le CMO Joseph Kerwin dans le Skylab 2 le 22 juin 1973 (nasa.gov)

Les membres d'équipage soignés sont donc accrochés à une paroi du vaisseau par des sangles en velcro et le soignant reste bien accroché lors de toutes les manipulations.

La propagation de sang lors des chirurgies a été limitée par la mise en place d'un système d'aspiration des fluides corporels, ou l'utilisation de champs opératoires gonflables avec des instruments stériles à l'intérieur. Mais leur utilité concrète a été discutée et ils n'ont pas été mis en service.

L'ensemble des équipements est adapté à une utilisation en impesanteur. Il n'y a ni matériel rotatif ni spray à bord. Les débris dentaires projetés par leur utilisation poseraient problème.

4.3.2 Contraintes de communication

L'isolement des membres d'équipage durant les missions spatiales est relatif. La station spatiale étant située à 400 km de la Terre, la communication avec le sol est permanente et les discussions se font en direct. Ainsi, en cas de problème d'ordre médical à bord, les astronautes ont la possibilité de joindre le « crew surgeon », un médecin au sol. Il est joignable 24 heures sur 24. De fait, les membres d'équipage n'hésitent pas à le consulter. La télémédecine à bord de la station spatiale a même intégré le programme Robonaut de la NASA, ayant abouti à la conception d'un robot humanoïde Robonaut 2 (R2) capable d'assister les astronautes dans leurs tâches notamment lors des soins médicaux. A bord de la station spatiale internationale depuis 2012 il peut être piloté depuis la Terre ou peut agir en autonomie et est capable de réaliser des échographies, injections voire d'autres procédures médicales (NASA Johnson 2014).

Ces avantages de la télémédecine seront d'une utilité limitée lors d'un voyage vers Mars. Le temps de latence d'une communication entre la Terre et Mars peut aller jusqu'à 20 minutes, soit 40 minutes entre la question et la réception de la réponse. Un acte médical avec la Terre en lien direct devient alors impossible.

4.3.3 Contraintes pour les soins dentaires

Compte tenu de l'environnement particulier des vols spatiaux, de la formation très succincte des CMO et de la limite du matériel embarqué, les soins dentaires sont simplifiés au maximum et les choix thérapeutiques sont de fait très restreints.

Si une urgence dentaire survient à bord de la Station Spatiale Internationale, le CMO contacte le médecin au sol pour lui exposer le problème. Celui-ci possède le dossier médical de chaque membre d'équipage avec l'ensemble des données dentaires : radiographies, modèles en plâtre, orthopantomogramme, photographies en couleur, ...

Il a pour rôle de conseiller au mieux le CMO dans sa prise de décision et d'autoriser ou non la réalisation de soins dentaires au cours de la mission (Gunepin et al. 2013).

Pour une même pathologie, la prise en charge sera radicalement différente entre ce qui se fait sur Terre et celle qui est préconisée dans un vaisseau spatial.

4.3.3.1 Traitement d'une lésion carieuse (Barratt et al. 2008; NASA 2008a)

En cas de lésion carieuse sans exposition pulpaire, sans inflammation irréversible, ni nécrose, le CMO suit le protocole relatif à l'obturation temporaire d'une dent. Une anesthésie préalable pourra être nécessaire. La description de l'acte tel que décrit dans le Medical Checklist est la suivante :

- Matériel nécessaire : miroir, sonde, excavateur, matériau d'obturation temporaire, gants non stériles, compresses
- Mettre les gants non stériles
- Brosset la dent lésée à l'aide d'une brosse à dent et de dentifrice et nettoyer la lésion carieuse à l'aide d'un excavateur

- Percer le tube de matériau d'obturation avec l'autre côté du bouchon
- Presser le tube avec les doigts pour faire sortir le matériau d'obturation
- Obturer délicatement la cavité et retirer les excès avec une compresse
- Serrer les dents et grincer, ouvrir la bouche, ajuster le matériau autant que nécessaire, retirer les excès avec la compresse
- Attendre 5 minutes que le matériau commence à durcir

Noter

Attendre 20 minutes à une heure avant de manger ou de boire, il est préférable d'attendre 24 heures avant d'utiliser la dent pour mastiquer le temps que le matériau ait fini sa prise.

- Contacter le médecin au sol pour un compte rendu

En cas de lésion carieuse plus volumineuse, une dent à l'état de pulpite ou de nécrose pulpaire, ce protocole ne devra pas être suivi.

4.3.3.2 Traitement de la douleur dentaire (Barratt et al. 2008; NASA 2008a)

4.3.3.2.1 Evaluation des signes cliniques et de la symptomatologie

- Infection (Abscess dentaire) : Œdème, fièvre, palpation de nodules sous la mandibule, rougeur ou écoulement purulent autour de la dent concernée, douleur sourde lors de la pression (non aigue ou lancinante), peut avoir ou non une sensibilité au chaud ou au froid.
- Pulpite : douleur provoquée par le chaud ou le froid, douleur à la pression, douleur dentaire spontanée
- Fêlure : Douleur aigue à l'occlusion et surtout au moment du relâchement, sensibilité au froid, signes de fêlure pouvant ou non être visibles.

Pour chacune des pathologies, un protocole distinct a été mis en place.

4.3.3.2.2 Traitement d'un abcès dentaire

- Contacter le médecin pour savoir s'il faut utiliser des antibiotiques. Si le chirurgien recommande l'emploi d'antibiotiques, se référer au tableau 1 (Figure 40) pour leur administration.

Table 1. Antibiotics

Medication	Dose	Use	Possible Side Effects
US MEDICATIONS			
* 500 mg amoxicillin (Amoxil) AMP (Pallet 1-A13, 14,15)	One tablet every 8 hours	Antibiotic	Nausea, diarrhea, rash
* 250 mg azithromycin (Zithromax) AMP (Pallet 1-B7)	Two tablets first day followed by one tablet one time per day for 4 days	Antibiotic	Diarrhea, nausea, abdominal pain, vomiting
RUSSIAN MEDICATIONS			
* ampicillin/oxacillin (Ampioks) ПВ-1	Two capsules four to six times per day for 7 days	Antibiotic	Nausea, vomiting, diarrhea

Figure 40 : Tableau 1 du Medical Checklist récapitulant l'administration d'antibiotiques à bord de l'ISS. (NASA 2008a)

Si malgré l'emploi d'antibiotiques le risque de propagation de l'infection est trop élevé, il faudra, sous la décision du médecin, réaliser l'avulsion de la dent causale.

4.3.3.2.3 Traitement de l'inflammation pulpaire irréversible

Le traitement de la pulpite se résume à un traitement symptomatologique de la douleur dentaire faible à modérée afin que le patient puisse achever correctement sa mission. Le CMO se référera au tableau 2 (Figure 41) pour l'administration d'antalgiques.

Table 2. Mild to Moderate Pain Medications

Medication	Dose	Use	Possible Side Effects
US MEDICATIONS			
* 400 mg ibuprofen (Motrin) AMP (Pallet 1-B5,6)	One tablet every 6 hours with food and drink as needed	Pain reliever, anti-inflammatory	Upset stomach, diarrhea
325 mg aspirin AMP (Pallet 1-B1,2)	Two tablets every 4 to 6 hour as needed	Pain reliever, anti-inflammatory	Upset stomach, ringing in ears
325 mg acetaminophen (Tylenol) AMP (Pallet 1-A1,2,3)	Two tablets every 4 to 6 hours as needed	Aspirin-free pain reliever	No significant side effects if taken within prescribed dose
RUSSIAN MEDICATIONS			
Analgin ПВ-1	One tablet three times per day	Non-narcotic analgesic agent	

Figure 41 : Tableau 2 du Medical Checklist relatif aux antalgiques de niveau 2 (NASA 2008a)

Si la douleur devient trop importante, qu'elle n'est pas soulagée avec les antalgiques du tableau 2, il faudra se référer au tableau 3 (Figure 42). Le patient ne pouvant pas supporter un traitement antalgique sur une longue période, une avulsion de la dent pathologique pourra être décidée. Cela permettra par la même occasion de prévenir une nécrose pulpaire et un risque d'infection.

Table 3. Severe Pain Medication

Medication	Dose	Use	Possible Side Effects
US MEDICATIONS			
*Eugenol (Dental-7)	Refer to {DENTAL - EXPOSED PULP} (SODF: ISS MED: DENTAL)	Anesthetic	
*hydrocodone, acetaminophen (Vicodin) AMP (P1-B3)	One to two tablets every 4 to 6 hours as needed	Oral narcotic pain reliever	Dizziness, drowsiness, nausea, vomiting constipation, urinary retention
*lidocaine with Epinephrine (Xylocaine with Epinephrine) AMP (Dental-05)	Refer to {DENTAL - INJECTION TECHNIQUE} (SODF: ISS MED: DENTAL)	Injectable local anesthetic	

Figure 42 : Tableau 3 du Medical Checklist référant les antalgiques pour les douleurs sévères (NASA 2008a)

4.3.3.2.4 Traitement de la fêlure

- Pour une douleur faible à modérée, se référer au tableau 2
- Pour une douleur sévère, se référer au tableau 3

La lidocaïne sert pour l'anesthésie de la dent. Ce traitement n'a pas vocation à agir sur le long terme. Il peut seulement permettre de temporiser le temps que l'astronaute rentre sur Terre. Si ce n'est pas possible rapidement, l'avulsion de la dent sera nécessaire pour prévenir une infection et soulager le patient.

En attendant il est conseillé de mastiquer de l'autre côté pour éviter de solliciter la dent.

4.3.3.3 Traitement des traumatismes dentaires (Barratt et al. 2008; NASA 2008a)

4.3.3.3.1 Fracture

En cas de fracture coronaire sans exposition pulpaire, si la dent est asymptomatique et qu'elle n'empêche pas une bonne mastication, il est conseillé de temporiser en contrôlant régulièrement la vitalité pulpaire.

En cas d'exposition pulpaire, un coton imbibé d'eugénol sera placé au contact de la pulpe afin de jouer un rôle antalgique. Il ne faut pas placer un matériau d'obturation provisoire. Une surveillance régulière devra être faite pour agir rapidement en cas de nécrose pulpaire. Si la durée de mission restante est importante, l'avulsion de la dent sera préconisée.

Pour les fractures corono-radiculaires, l'extraction de la dent est la seule solution à bord de la station spatiale.

4.3.3.3.2 Subluxation

La subluxation peut être associée à une fracture dentaire ou osseuse. Le patient ayant subi un tel traumatisme devra être examiné avec attention. Si la mobilité de la dent est faible, le patient devra juste éviter de manger sur la dent concernée pendant 1 semaine. Si la dent est déplacée et qu'elle gêne l'occlusion, il faudra réaliser une anesthésie et repositionner la dent dans sa position initiale. L'alimentation devra alors être exclusivement molle. La vitalité de la dent devra être surveillée afin d'intervenir rapidement en cas de nécrose.

4.3.3.3.3 Expulsion dentaire

Si le traumatisme entraîne une expulsion de la dent de son alvéole, la première chose à faire est de retrouver la dent. L'impesanteur rend le risque d'inhalation de la dent beaucoup plus important. La dent peut également être nichée dans les tissus mous de la cavité orale.

Une fois la dent localisée :

- Contacter le chirurgien aussi vite que possible
- Stocker la dent dans un sachet hermétique afin d'éviter de la perdre dans le module. Ne pas replacer la dent dans l'alvéole
- Contrôler le saignement en faisant mordre le patient sur une compresse
- Au bout de 20 minutes, retirer la compresse et inspecter le saignement de l'alvéole. Si l'hémorragie est toujours présente, replacer une compresse et faire mordre le patient 20 minutes supplémentaires
- Ne pas brosser les dents les jours suivants
- Suivre un régime alimentaire mou pendant 3 jours et faire des bains de bouche à l'eau chaude et salée 3 fois par jour. Ne pas cracher énergiquement ni boire à la paille pendant 3 à 4 jours.

4.3.3.4 Avulsion de dent

L'avulsion dentaire ne doit être réalisée que lorsque toutes les autres options thérapeutiques ont été écartées et en accord avec le médecin au sol.

La description précise de la procédure est décrite dans le Medical Checklist de la façon suivante :

- Matériel utile : élévateurs 301 et 34S (le numéro est indiqué sur le manche de l'élévateur) ; compresses (x4) ; un des daviers suivants 151AS (pour incisives, canines et prémolaires), 17 (pour molaires inférieures), 10S (pour molaires supérieures)
- Anesthésier la zone autour de la dent à extraire

Attention : toute extraction requiert une force douce à modérée. Ne pas utiliser de force trop importante pour retirer la dent. Cela risquerait une fracture sur une autre dent ou l'os.

- Placer le davier correctement sur la dent à extraire en appliquant une force dirigée vers les racines de la dent et serrer le davier avec une force modérée

- Exercer une force rotationnelle douce à modérée en tenant 30 seconde dans chaque direction. Continuer jusqu'à ce que la dent se desserre et sorte de son alvéole par elle-même
- Si après quelques minutes la mobilité de la dent n'a pas augmenté, passer à l'étape suivante
- Depuis la face de la joue (face vestibulaire), placer le petit élévateur 301 entre la dent à extraire et la dent adjacente avec la partie creuse de l'élévateur contre la dent à extraire. Appliquer une force rotationnelle modérée à l'élévateur (comme si on tournait un tournevis) afin de créer une force élévatoire à la dent et tenir pendant 60 secondes. Appliquer cette force de façon séquentielle sur les deux bords de la dent. Une fois que la dent est légèrement surélevée, répéter cette étape avec un large élévateur 34S uniquement si l'espace disponible est suffisant
- Revenir aux étapes précédentes avec le davier approprié
- Une fois la dent extraite, placer une compresse sur l'alvéole d'extraction jusqu'à l'arrêt du saignement
- Placer les compresses imbibées de sang dans un sachet hermétique puis dans les déchets contaminés
- Contrôler le saignement en appliquant une pression directement sur l'alvéole avec une compresse
- Au bout de 20 minutes, retirer la compresse et contrôler de nouveau. Si le saignement persiste, placer une autre compresse, pour 20 minutes supplémentaires.
- Ne pas se brosser les dents les jours suivants
- Suivre un régime alimentaire mou pendant 3 jours et se rincer la bouche trois fois par jour avec de l'eau chaude et salée.
- Ne pas cracher énergiquement ni boire à la paille pendant 3 à 4 jours

5. Apports de l'Odontologie Spatiale

L'expérience des missions spatiales et les expérimentations scientifiques réalisées dans les conditions des vols spatiaux ont permis de faire émerger de nouvelles connaissances. Nombre de ces apports profitent à la Médecine et à l'Odontologie.

5.1 Application à la Santé Publique

Les mesures préventives ont montré leurs efficacités au cours des missions spatiales. Elles placent les astronautes dans une population à risque carieux très faible. Il en va de même pour le risque d'abcès ou de parodontite. Pourtant il a été montré que l'environnement spatial augmente le risque de survenue d'un problème bucco-dentaire.

Ainsi, il est légitime de penser que si on appliquait le même niveau de prévention et de sensibilisation à la population générale, l'incidence des lésions carieuses, abcès dentaires et parodontites chuterait fortement.

A ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à cette problématique. Il serait donc intéressant d'appliquer les mêmes règles en matière de prévention dentaires pré-vol que les astronautes à la population générale et de chiffrer la diminution de l'incidence : contrôle dentaire annuel, suppression de tous les traitements à risque jusqu'à obtenir une radiographie panoramique parfaite, détartrage et vernis fluoré, et sensibilisation majeure des patients à l'importance de l'hygiène bucco-dentaire.

Les résultats pourraient éventuellement inciter les pouvoirs publics à revoir leur politique de santé afin de renforcer la prise en charge de la prévention.

Les missions spatiales habitées ont toujours suscité un engouement important au sein des populations. On l'a vu à l'échelle internationale en 1969 avec les premiers pas de l'Homme sur la Lune. Cela s'est confirmé plus récemment à l'échelle nationale avec la mission de Thomas Pesquet à bord de la Station Spatiale Internationale. La couverture médiatique a été considérable. Les astronautes deviennent alors une vitrine et peuvent facilement faire passer des messages à la population et plus particulièrement aux enfants. On a vu comment les astronautes font leur toilette quotidienne dans les conditions très particulières d'un vol spatial avec notamment la démonstration du brossage des dents (Canadian Space Agency 2013). L'utilisation des réseaux sociaux permet de couvrir une population plus jeune et plus large et les agences spatiales les exploitent parfaitement. Les interventions des astronautes deviennent quotidiennes et leurs portées sont immense. Il serait donc dommage de ne pas saisir cette opportunité pour faire passer des messages, notamment de prévention bucco-dentaire. La NASA a déjà utilisé ce procédé durant les missions Apollo avec des slogans tels que « *Even on the Moon the Apollo crew cleaned their teeth ... why can't you ?* » (« Même sur la Lune l'équipage Apollo s'est brossé les dents, pourquoi pas toi ? ») (Garrel 1995; Genevrier 2004).

5.2 Améliorations à apporter

L'expérience héritée de ces 6 dernières décennies d'exploration humaine de l'espace, malgré ses innombrables réussites, a permis de cibler les lacunes existantes.

La Dentisterie Spatiale s'est essentiellement concentrée sur la Prévention plus que sur les soins en cours de mission. Le résultat a été à la hauteur des espérances des agences spatiales puisque, depuis le cas du russe Youri Romanenko en 1978, les problèmes dentaires en cours de mission ont été très rares et se sont limités à des petites lésions carieuses qui ont été traitées à bord et n'ont pas entravé le bon déroulement de la mission. Aucun astronaute n'a dû être rapatrié sur Terre pour une urgence dentaire.

Mais les missions spatiales ne dépassent actuellement pas les 6 mois, ce qui est heureusement insuffisant pour qu'un astronaute en parfait état de santé au niveau bucco-dentaire ne développe une pathologie s'il respecte les consignes en termes d'alimentation et d'hygiène bucco-dentaire. Cependant, dans le cas probable de futures missions vers Mars, la durée des vols spatiaux pourra avoisiner les 2 ans. Le contexte n'est alors pas le même. En l'absence de détartrage en cours de mission, le risque de développer une gingivite voire une parodontite augmente nettement, surtout dans les conditions d'un séjour dans l'espace où le flux salivaire est diminué, les défenses immunitaires sont amoindries, le stress omniprésent et l'état de confinement et d'isolement prolongé risquant de perturber une bonne hygiène alimentaire et bucco-dentaire.

La probabilité de voir survenir un incident devient alors beaucoup plus élevée. La formation des CMO devrait être plus approfondie et le matériel à bord complété avec l'ajout d'instruments à ultrasons pour réaliser des détartrages, une instrumentation rotative afin de traiter plus efficacement une lésion carieuse et un appareil de radiographie.

Pour aller plus loin, il serait même indispensable qu'un médecin formé aux soins dentaires plus complexes fasse parti de l'équipage pour une telle expédition. Il pourrait alors réaliser des contrôles réguliers et au moins un détartrage avec ajout de vernis fluoré en cours de mission.

6. Interviews

L'interview de personnalités marquantes de la médecine spatiale européenne a semblé indispensable afin de recueillir une expérience concrète des contraintes médicales autour des missions spatiales. Après avoir contacté le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et l'Institut de Médecine et de Physiologie Spatiale (MEDES), leur filiale santé basée à Toulouse, nous avons été mis en relation avec le Docteur Godard, actuelle médecin des astronautes au Centre Européen des Astronautes (CEA) à Cologne et le Docteur Comet, ancien médecin des astronautes, actuel président du Medical Board au sein de l'Agence Spatiale Européenne.

6.1 Entretien téléphonique avec le Docteur Brigitte GODARD

Le Docteur Godard est l'actuelle médecin des astronautes européens, en fonction depuis 2010. Elle est basée au centre européen des astronautes à Cologne, en Allemagne. Elle a été le médecin attitré de Thomas Pesquet durant sa mission à bord de la Station Spatiale Internationale.

Existe-t-il un dentiste spécialisé dans la dentisterie spatiale exerçant exclusivement avec l'ESA ?

A Cologne, il y a des dentistes réalisant l'examen annuel nécessaire au suivi dentaire des astronautes. Ils n'ont aucune formation spécifique et ne sont donc pas spécialisés dans l'aérospatial, mais ont l'avantage de connaître les examens demandés par les médecins réalisant le suivi global des patients astronautes. Ils doivent remplir un questionnaire fourni par les médecins. L'astronaute n'a par contre aucune obligation de consulter le dentiste travaillant pour l'ESA. Il peut très bien être suivi par son dentiste en ville s'il le désire, mais à l'obligation de passer par le dentiste ESA pour son évaluation annuelle car ce dentiste va fournir un rapport en anglais avec toutes les informations demandées par les médecins qui au final vont nous permettre de savoir si cet astronaute est apte pour le vol sur le plan dentaire.

Quel est la fréquence des visites médicales avant et pendant le vol ?

Les astronautes ont une visite médicale annuelle imposée afin de faire un bilan global de leur état de santé. Ces examens médicaux pré-vol ne sont pas réalisés par le même médecin qui les suivra durant leur mission à bord de la station spatiale internationale et à leur retour sur Terre. Cette décision a initialement été prévue afin de séparer la fonction du médecin des astronautes et celle de médecin expert. L'expert étant celui qui peut annuler une mission du fait d'une contre-indication médicale.

Pendant toute la durée de la mission, chaque astronaute a un rendez-vous hebdomadaire avec son médecin. C'est l'occasion de s'assurer que l'astronaute s'acclimate bien avec son nouvel environnement, que son alimentation est suffisante et que la pratique d'une activité sportive indispensable à l'organisme est bien réalisée.

Y a-t-il une prise en compte spécifique de l'aspect psychologique lié à la mission spatiale ?

Tout à fait, la prise en charge psychologique des astronautes fait partie du check-up avant pendant et après toute mission et est évidemment aussi importante que le reste des examens médicaux. En plus de la visite médicale hebdomadaire, les astronautes sont en relation avec un psychologue toutes les 2 semaines. Celui-ci s'assurera que les astronautes vivent bien leur mission.

Les astronautes ont la possibilité en plus de contacter le médecin pour parler d'un sujet médical ou pour toute autre raison, en dehors des rendez-vous programmés. Ils peuvent en effet contacter le médecin par iPhone ou mail à n'importe quel moment. Mais ils évitent cette procédure tant que possible ou essaient d'être discret dans le motif de ce rendez-vous exceptionnel car ils ont peur que les responsables de la mission ne l'interprètent comme une urgence médicale avec potentiellement un arrêt de la mission en cas de danger pour la santé de l'astronaute.

Enfin le commandant de bord peut prendre la responsabilité de contacter lui-même le médecin pour un des membres d'équipage s'il a l'impression qu'il y a une condition médicale que le médecin doit connaître afin d'aider son patient. Il faut savoir que les membres d'équipage ont commencé à travailler ensemble et à se côtoyer longtemps avant le début de la mission spatiale. Ils se connaissent donc très bien et forment une vraie famille à bord.

Enfin il faut noter que les astronautes ont été sélectionnés pour la mission et qu'ils ont donc passés un entretien psychologique. Ils ont de plus au cours de leur formation subis des mises en conditions en milieu extrême afin par exemple de simuler un atterrissage dans lequel ils sont seuls pendant 48 heures. C'est une forme d'exercice de survie en milieu hostile qui permet surtout de tester leur capacité à gérer le stress.

La relation de confiance est donc une limite dans le suivi des astronautes ?

Oui. La plupart des astronautes sont des pilotes de formation. Pour eux le médecin rime avec la personne qui peut entraver leur accréditation au vol en cas de suspicion d'un problème de santé. Pour privilégier leur carrière professionnelle, ils peuvent très certainement masquer ou atténuer leurs petits désagréments médicaux.

Il est vraiment nécessaire d'instaurer une relation de confiance forte par un suivi avec le même praticien longtemps avant la mission et une meilleure conscience par l'astronaute du secret médical qui le lie à son médecin. Je leur dis souvent que leur formation a coûté tellement cher qu'on cherche au contraire à tout faire pour les envoyer en mission dans les meilleures conditions possibles que de les en empêcher.

Certains astronautes sont désignés Crew Medical Officer (CMO) et seront les « médecins à bord ». Comment se déroule leur formation ?

Jusqu'en 2013, les astronautes européens étaient formés exclusivement aux Etats Unis par la NASA. Depuis, ils réalisent une grande partie de leur formation là-bas, mais ont également un apprentissage dans notre centre européen des astronautes à Cologne.

Aux Etats Unis, les astronautes ont une formation à la fois théorique et pratique sur mannequins, ainsi que des exercices de gestion des urgences dans la base de reconstitution de la station spatiale grandeur nature. Ils apprennent par exemple à faire des injections intraveineuses, intramusculaires ou intra-osseuses, des perfusions ou la réalisation de points de suture. A part cela, il n'y a pas de formation chirurgicale à proprement parler. L'idée est de gérer une urgence et de stabiliser le patient à bord avec la possibilité de le rapatrier sur Terre en cas de gros problème engageant le pronostic vital de l'astronaute malade.

Au centre européen des astronautes, les futurs CMOs ont une formation de 3 jours au cours desquels ils revoient les grandes pathologies de l'organisme dont un créneau consacré aux soins

dentaires. Celui-ci ne dure qu'une heure et demi et est très succinct. Depuis peu les astronautes ont la possibilité de venir en clinique, au sein d'un hôpital pour leur faire prendre conscience de pathologies graves et anticiper leur éventuelle réaction en cas de décès d'un astronaute (cas évidemment extrême).

En cas de problème à bord de la station spatiale, quel est le déroulement de la situation ?

En théorie, le protocole voudrait qu'un médecin sur Terre soit contacté et discute en direct avec un membre d'équipage spécialisé afin de diagnostiquer le problème médical et suivre ensemble les étapes de soins. Mais de telles urgences sont heureusement extrêmement rares. En pratique, les astronautes sont tout à fait autonomes en mission. Ils ont libre accès au kit médical à bord et se servent abondamment des médicaments qu'ils jugent utiles. Ainsi la consommation de somnifères et d'antalgiques est importante. Les astronautes sont censés déclarer à chaque fois la date et l'heure de prise de chaque médicament. Mais l'examen régulier du stock de médicaments disponible nous montre bien que de nombreux médicaments sont pris à notre insu et il nous est très difficile de savoir qui a consommé quoi et quand. Cela d'autant plus que ce sont les américains qui gèrent le kit médical.

Il y a de nombreuses réunions réunissant les corps médicaux de tous les pays participant, au cours desquelles chaque intervenant doit raconter tout ce qui s'est passé au niveau médical de façon à ce que chacun puisse profiter de l'expérience des autres.

Dans le cas d'un voyage vers Mars, la liaison avec la Terre ne permet pas une télé-médecine.

Effectivement, si une urgence médicale arrivait au cours d'un voyage habité vers la planète Mars, ou qu'un soins complexe était nécessaire, le temps de latence entre l'émission et la réception (de l'ordre de 20 minutes) rendrait une communication avec le médecin sur Terre très délicate, voire irréalisable dans le cadre de la réalisation de soins. De plus, contrairement à la station spatiale internationale, le rapatriement de l'astronaute malade serait impossible. Surtout, à l'heure actuelle, les membres d'équipage CMOs ne sont pas formés pour gérer ce genre de problème. C'est pour cela que je considère qu'il est indispensable qu'un médecin ou qu'un chirurgien soit présent à bord du vaisseau spatiale qui se dirigera vers Mars. De plus il faut le matériel médical en suffisance pour pallier à tous les problèmes possibles, ce qui n'est aujourd'hui pas le cas.

Quel est le contenu du kit médical à bord de l'ISS ?

Le kit médical est fourni par la NASA pour l'ensemble de l'équipage de la station spatiale. Son contenu est confidentiel. Il est divisé en 6 parties avec les médicaments, les soins d'urgence, les soins dentaires. Il y a même de quoi intuber si nécessaire. Tout est fait pour que l'utilisation soit la plus simple et la plus ergonomique possible.

Le kit médical est réduit à son strict minimum compte tenu du manque de place à bord et du risque relativement faible de voir survenir un problème médical. La tendance va même à la suppression de matériel médical, notamment dentaire.

N'est-ce pas un peu risqué d'agir ainsi surtout compte tenu de l'augmentation de la durée des missions ?

Si, mais il faut voir les choses dans la globalité. Les agences spatiales ont un budget de plus en plus restreint, et leur préoccupation première est le bon déroulement des missions scientifiques à bord de la station spatiale. Nous, les médecins, sommes considérés comme des personnes qui contraignent la formation scientifique des astronautes et pèsent sur le budget alloué aux missions spatiales. C'est un combat continu pour parvenir à améliorer les examens préventifs et le suivi médical des astronautes en vol. Cela peut même être parfois un peu frustrant de se voir refuser une demande qui nous semble légitime pour la santé des membres d'équipage.

Quelle prévention est mise en place au niveau bucco-dentaire pour prévenir un problème en cours de mission ?

Il faut savoir qu'un astronaute ne décolle pour la station spatiale que si son état bucco-dentaire est parfait. Cela signifie qu'aucun problème n'est susceptible d'apparaître au cours des 12 prochains mois sans nécessité de réaliser des soins. S'il y a le moindre doute sur une dent ou une prothèse dentaire, l'astronaute ne peut pas partir en mission. C'est un dentiste qui fait le contrôle avant le départ et remplit un questionnaire en répondant justement à ce type de question.

Y a-t-il une prise en compte du risque carieux dans l'élaboration des menus à bord de la station spatiale ?

A priori non, la seule préoccupation est que les aliments ne soient pas trop salés et que les astronautes mangent en suffisance.

Comment contrôlez-vous la fréquence des prises alimentaires et la quantité consommée ?

Pour la fréquence des repas, un emploi du temps détaillé est établi pour chaque journée à bord. Il est indiqué les horaires de lever, de coucher, de réalisation des expériences scientifiques et les séances de sport quotidienne. Pour les repas on s'assure qu'ils aient au moins une heure pour manger et que cette heure soit bien placée, par exemple pas juste avant une séance de sport. A part cela on a très peu de contrôle. Les astronautes ne respectent pas forcément l'emploi du temps défini et personne n'est là pour leur dire quoi faire. Ils sont très autonomes et s'ils manquent de temps pour une tâche ils ont l'habitude de grignoter une barre de céréale sur le pouce.

Pour ce qui est du contenu des repas, ils sont tout à fait libres de choisir ce qu'ils veulent manger à condition d'avoir le bon nombre de calories en fin de journée. Un programme a été mis en place sur iPad leur permettant de sélectionner sur une liste déroulante les aliments consommés à chaque repas et d'avoir ainsi la quantité de calories consommées. Si un aliment n'est pas sur la liste, ils peuvent le prendre en photo. Cela nous permet de contrôler leur consommation et de leur conseiller au besoin un aliment qui leur manquerait pour l'équilibre de leur alimentation. Ce programme est plutôt apprécié des membres d'équipage et cela fonctionne plutôt bien pour l'instant.

Qu'en est-il du contrôle de l'hygiène bucco-dentaire ?

A l'inverse du contrôle de l'alimentation, il n'y a aucun contrôle de l'hygiène buccale des astronautes. Ils ont seulement pour objectif d'être rigoureux dans le brossage des dents, mais il nous est impossible de savoir ce qu'ils font réellement à bord. Un contrôle de l'indice de plaque avant le départ et à leur retour nous permet de voir que les recommandations en termes d'hygiène sont respectées. Malheureusement ce contrôle post-vol ne fait pas parti des examens obligatoires et systématiques, ce qui devrait effectivement être le cas.

Y a-t-il à l'instar des pilotes d'avions des douleurs liées à des surpressions intra-pulpaire (barodontalgies) lors des vols en impesanteur ou des sorties extravéhiculaires en scaphandre ?

Il n'y a pas eu de cas rapportés pour ce genre de douleurs. Mais comme je vous le disais, les astronautes sont très autonomes et prennent abondamment des antalgiques pouvant ainsi masquer ce genre de problème. Sans retour d'expérience précise de leur part, il nous est très difficile de déceler ces désagréments.

Observe-t-on une augmentation du risque de fêlure ou de fracture lors des phases de décollage ou d'atterrissage pouvant être assez violentes ?

De la même façon, je n'ai pas eu de cas rapporté, mais les américains commencent à recommander le port de gouttières de protection dentaires lors des phases de décollage et d'atterrissage. Je sais par exemple que Thomas Pesquet avait une gouttière avec lui, maintenant, je ne sais pas s'il l'a réellement portée.

6.2 Interview du Docteur Bernard COMET

Le Docteur Comet est un ancien médecin des astronautes européens. Il a aujourd'hui une activité importante au sein du MEDES, basé à Toulouse. Il s'occupe toujours de la formation médicale théorique des CMO et de la sélection des astronautes européens. Il préside le Medical Board au sein de l'Agence Spatiale Européenne.

Comment vous êtes-vous retrouvé médecin des astronautes ?

Mon histoire n'est pas banale. J'ai commencé par une prépa math sup math spé. Mon diplôme m'a permis de travailler pendant 1 an dans une usine dans les Pyrénées Atlantiques. C'est par hasard, pour suivre ma femme que je suis retourné à Toulouse en 1975. J'ai cherché un travail dans l'aéronautique, mais je n'ai rien obtenu. J'ai alors trouvé un poste de professeur de mathématiques à l'école d'architecture. J'ai alors eu beaucoup de temps libre, ce qui ne me correspondait pas. Une grande partie de ma famille travaillant dans le domaine de la santé, je me suis inscrit au concours de médecine en parallèle de mon travail à l'école d'architecture. J'ai terminé 11^{ème} sur 1100 à l'issue des examens. Au cours de mon internat, j'ai croisé Patrick Baudry et Jean-Loup Chrétien à l'hôpital et nous avons discuté un certain temps avant que Hubert Curien président du CNES n'entre dans la salle. Les astronautes lui ont dit « voilà le médecin qu'il faut que vous embauchiez ! » et le lendemain de la soutenance de ma thèse, j'étais embauché en tant que médecin des astronautes.

Quels ont été les évolutions de responsabilité à votre poste ?

Il y a eu peu de changement dans les responsabilités qui m'ont été attribuées. J'ai été sur quelques projets pour lesquels mon poste a différé, comme sur le projet de navette spatiale européenne Hermès pour lequel j'étais responsable du crew système, c'est-à-dire que je m'occupais de la partie technique de l'aménagement du matériel pour l'équipage. Ce projet a toutefois été avorté en 1994 faute de budget suffisant.

J'ai appris à parler le russe ce qui m'a été d'une grande utilité au début de ma carrière pour donner mon point de vue sur les critères d'exclusion des astronautes européens.

Je suis aujourd'hui responsable de la formation médicale de base des astronautes pour lesquels je donne des cours théoriques. Je participe à la décision au niveau européen des aptitudes des astronautes lors de leur sélection. Actuellement je préside le « Medical Board » de l'ESA.

Avez-vous noté une évolution importante au cours de votre carrière dans les domaines suivants :

Budget alloué au médical par les agences spatiales ?

Nous n'avons jamais eu de problème au niveau du budget pour tout ce qui touche au médical. Le montant du matériel médical embarqué est insignifiant comparé au budget que représente une mission spatiale (environ 20 millions d'euros par membre d'équipage). Et à chaque fois que l'on a eu une demande on a obtenu ce que l'on a demandé tant que la demande était justifiée.

Formation à la médecine spatiale des médecins/dentistes ?

Il n'y a pas de formation spécifique à la médecine spatiale. Mais il existe une capacité de médecine aérospatiale d'une durée de 2 ans ouverte aux médecins comme aux dentistes. Elle ne donne pas accès à un poste au sein de l'agence spatiale européenne, mais c'est un plus pour les professionnels de santé intéressés.

Prévention bucco-dentaire ?

Il y a eu à ce niveau de nettes progrès entre le début de ma carrière et aujourd'hui. Pour l'anecdote, lorsque j'ai commencé à suivre les astronautes français dans les années 1980, pour les missions avec les russes, les critères d'exclusion étaient totalement radicaux. Selon eux, toute dent traitée au niveau radiculaire (endodontiquement) devait être extraite même en l'absence de symptomatologie depuis de nombreuses années et d'absence d'image litigieuse à la radiographie panoramique. Une fois les dents retirées ils nous disaient que la capacité masticatoire étant insuffisante, l'astronaute était alors en incapacité de partir. J'ai dû me battre avec l'aide de stomatologues pour montrer que même une dent présentant un traitement canalair, si la radiographie panoramique est parfaite et qu'il n'y a pas de symptomatologie, il n'y avait aucun risque d'abcès et que les dents pouvaient être conservées.

Aujourd'hui les astronautes peuvent même partir avec des implants en bouche.

Au moment de leur départ, leur état de santé bucco-dentaire est parfait sans aucune suspicion de lésion carieuse ni de risque d'abcès périapical. Un détartrage puis une application de vernis fluoré sont réalisés sur les astronautes. Ils sont particulièrement bien sensibilisés à la nécessité d'avoir une hygiène dentaire rigoureuse après chaque repas.

Hormis la prévention au niveau dentaire, c'est toute la prévention des pathologies générales qui a progressé. On arrive par exemple à lutter très efficacement contre la perte de densité osseuses grâce à la dernière machine de musculation à bord de la station spatiale « ARED ». On a même pour certains astronautes une augmentation de la densité de leurs os par rapport à avant le vol.

D'autres préventions sont en cours d'évaluation et sont amenées à évoluer comme les problèmes oculaires liés à un œdème du nerf optique. On réalise un fond d'œil une fois par mois chez les astronautes en mission et on commence à récupérer les statistiques. Cela va nous servir pour savoir si on peut prévenir le problème ou identifier les astronautes à risque. La pratique de la médecine spatiale s'est de plus en plus tournée vers les données scientifiques des études cliniques. On s'appuie ainsi beaucoup plus sur les statistiques et les probabilités de pathologie pour prévenir les problèmes médicaux.

Alimentation à bord ?

Là aussi on a obtenu de grosses améliorations. On est loin des barres nutritives des débuts des missions spatiales. Aujourd'hui les astronautes peuvent manger pratiquement comme sur Terre. Sur la station spatiale internationale, il y a un ravitaillement toutes les 6 semaines avec des aliments frais (fruits légumes) très prisés des membres d'équipage. Les menus sont nettement plus équilibrés d'un point de vue diététique. Maintenant les contraintes de l'environnement spatial notamment l'impesanteur nécessitent des aliments relativement collants. On y adjoint donc des liants qui rendent aux aliments une saveur semblable et qui par leur nature collante peuvent effectivement adhérer aux dents plus longtemps et augmenter ainsi le risque carieux.

Le contenu du kit médical embarqué à bord de l'ISS est maintenu confidentiel par la NASA. Pourquoi un tel secret ?

A l'origine cette confidentialité a été instaurée car un astronaute a été victime d'effets secondaires liés à la prise d'un médicament dans la trousse de soins d'urgence. Il a porté plainte contre la NASA en leur reprochant de ne pas avoir été suffisamment bien informé. Mais cette confidentialité n'a aucun sens puisque le contenu de ce kit est consultable sur internet.

Quel est le contenu du kit de soins dentaire ?

On trouve dans le kit de soins dentaire tout ce qui est nécessaire à la réalisation des soins décrits dans le MED LIST. C'est un document regroupant tous les problèmes pouvant survenir avec une explication de la procédure à tenir face à eux. On y trouve donc des aiguilles d'anesthésie (longues et courtes), des compresses, des miroirs, des sondes, du ciment de scellement provisoire, du papier à articuler, des instruments pour extraire une dent, et un matériau d'obturation provisoire.

J'ai lu que la NASA avait élaboré un dentifrice (NASAdent) ayant pour particularité de ne pas mousser et de pouvoir être avalé. Connaissez-vous la composition de celui-ci ?

Non je ne connais pas la composition exacte de ce dentifrice, il doit être comme tous les dentifrices comestibles disponibles pour le grand public. De toutes les façons, aucun dentifrice n'est imposé à bord de la station spatiale et la plupart du temps les astronautes apportent leur propre dentifrice et recrachent dans une serviette.

Comment se déroule la formation médicale des CMO (Crew Medical Officer) ?

Il y a un CMO par équipage de Soyouz, soit un pour trois membres d'équipage et donc en moyenne 2 présents à bord de l'ISS. S'il y a un médecin parmi les astronautes, c'est lui qui sera désigné, sinon c'est un volontaire qui sera désigné, à défaut c'est le commandant de bord qui s'y collera.

La formation est très basique elle porte sur 20 heures de théories et 20 heures de travaux pratiques sur mannequin ou sur les formateurs s'ils acceptent (prise de sang, pression artérielle, ...) Ils apprennent à faire des sutures, des injections intramusculaires et intraveineuses, à intuber. Ils ont une formation un peu plus poussée sur les médicaments disponibles dans le kit médical. Les futures CMO ont un stage de 15 jours à faire aux urgences sans obligation de réaliser des soins. Certains d'entre eux sont très actifs et font beaucoup d'actes sur patients, d'autres sont passifs et restent dans l'observation. Ils ne restent en général pas les 15 jours car ils ont beaucoup de choses à faire. Ils ont en plus un interrogatoire sur le médical check-list afin de vérifier qu'ils maîtrisent au moins cela.

Ils n'apprennent rien de plus que les actes décrits dans le médical check-list.

Pour ce qui est des soins dentaires, ils ont juste un diaporama qui récapitule les actes décrits dans le document embarqué, sans travaux pratiques obligatoires.

Quoi qu'il en soit en cas de doute ils peuvent appeler le crew surgeon (médecin-chirurgien resté au sol) disponible en permanence, et communiquer avec lui en direct, ce qu'ils n'hésitent jamais à faire.

Comment pallier les contraintes liées à l'environnement spatial pour la réalisation des soins ?

C'est très simple, le patient est accroché à une paroi à l'aide de velcros ce qui facilite la manipulation. Les seringues sont toutes pré-remplies pour les intraveineuses afin d'éviter un risque de bulle d'air difficile à gérer en impesanteur. On a essayé des systèmes de champs opératoires stériles gonflables ou des aspirations pour éviter que du sang ne se promène partout, mais le bénéfice apporté n'est pas flagrant.

Quelle est la place attribuée aux soins et à la prévention dentaires par rapport aux autres spécialités médicales ?

Nous attachons la même importance à la prévention et aux soins dentaires qu'à toutes les autres spécialités médicales. Entre 5 et 10 % du budget médical, du temps de formation et de sensibilisation sont consacrés au dentaire.

Dans le contexte théorique d'un voyage vers Mars avec des missions nettement plus longues, quand est-il de la problématique de la prévention et des soins dentaires ?

Il est évident qu'en cas de mission de très longue durée pouvant durer un an et demi à deux ans, le risque de voir survenir un événement dentaire à bord est très augmenté. Si on fait aujourd'hui le maximum en termes de prévention dentaire en n'envoyant dans l'espace que des astronautes avec un état dentaire parfait, des dents sans tartre et recouvertes d'un vernis fluoré, aucune étude ne chiffre la probabilité de survenue d'un problème carieux, infectieux ou parodontal avec cette prévention. Il serait d'ailleurs très intéressant de faire une étude sur la population générale en appliquant un tel degré de prévention afin de connaître la probabilité de survenue d'un problème dentaire dans ce contexte. Sans ce genre de données, il nous est difficile de prévoir quel va être le risque sur des missions de durée plus importante.

De mon point de vue, si on souhaite envoyer des hommes sur Mars, il faut qu'il y ait un médecin dans l'équipage qui soit formé à réaliser des soins dentaires. Il faudrait que des détartrages

soient réalisés en cours de mission et il faudrait embarquer un appareil permettant de faire des radiographies dentaires.

Des dentistes sont-ils inclus dans les agences spatiales et sont-ils consultés pour l'élaboration des futures missions ?

Il n'y a pas de dentiste collaborant avec l'agence spatiale européenne en direct. Un dentiste allemand vient régulièrement au centre européen des astronautes mais de façon bénévole, par plaisir.

Pour l'élaboration des missions, un stomatologue travaille avec nous et nous conseille.

Ces entretiens ont permis d'expliquer concrètement les rapports existants entre les spationautes et le corps médical des agences spatiales, mais aussi de montrer comment la prise en charge médicale et dentaire des astronautes a évolué au cours des dernières décennies. Cela permet de mettre en évidence les améliorations réalisées dans ce domaine, mais aussi le travail qu'il reste à accomplir pour rendre un voyage habité vers la planète Mars possible.

Conclusion

Malgré un ralentissement dans les projets spatiaux depuis les missions Apollo et les programmes de navettes spatiales, la Station Spatiale Internationale semble avoir donné un nouveau souffle aux futures missions extra-terrestres. On parle aujourd'hui de projet de base lunaire ou de missions d'exploration habitée de la planète Mars. Ces projets ambitieux ont en commun un allongement considérable de la durée des missions comparée à celle des missions qui ont précédé.

Les contraintes de l'environnement spatial sont aujourd'hui connues et bien appréhendées. Le confort des missions s'est amélioré avec une alimentation plus proche de celle consommée sur Terre, un système de recyclage de l'eau très performant permettant aux astronautes une consommation abondante et des moyens de communication avec la Terre rendant l'isolement moins difficile à supporter sur le long cours.

La question de la santé des membres d'équipage s'est également améliorée. Par exemple, la dernière machine de musculation (ARED) installée à bord de la station spatiale permet actuellement de prévenir complètement la perte de densité osseuse.

Cependant, l'augmentation de la durée des missions soulèvera d'autres problématiques. Les pathologies dentaires étant aujourd'hui maîtrisées grâce à une très bonne prévention réalisée en amont du vol, ne pourront pas l'être avec des missions de 2 ans. Des solutions devront donc être trouvées afin de limiter au mieux la survenue d'incidents et de permettre le cas échéant la réalisation de soins efficaces à bord (avulsion, suivi parodontal, gestion des lésions carieuses, ...).

Devant la récurrence des projets d'exploration habitée vers la planète Mars, il est évident que ces nouveaux défis nécessiteront une amélioration considérable de la prise en charge des problèmes médicaux et dentaires avant de pouvoir se réaliser.

Bibliographie

- Agence Spatiale Canadienne. Le voyage dans l'espace et les effets de l'apesanteur sur le corps humain [Internet]. [cité 17 juin 2017]. Disponible sur: http://www.cssh.qc.ca/enseignants/sylvain.bedard/10_11/sciences/apesanteur.pdf
- Allen JAV. Observation of High Intensity Radiation by Satellites 1958 Alpha and Gamma. *J Jet Propuls.* 1958;28(9):588- 92.
- Alperin N, Bagci AM, Oliu CJ, Lee SH, Lam BL. Role of Cerebrospinal Fluid in Spaceflight-induced Ocular Changes and Visual Impairment in Astronauts. *Radiology.* 21 avr 2017;161981.
- Baker DN, Jaynes AN, Hoxie VC, Thorne RM, Foster JC, Li X, et al. An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature.* 27 nov 2014;515(7528):531- 4.
- Ball J, Evans C. Safe Passage: Astronaut Care for Exploration Missions [Internet]. Washington, D.C.: National Academies Press; 2001. Disponible sur: <http://www.nap.edu/catalog/10218>
- Barratt M, Pool S, Hodapp MH. Principles of Clinical Medicine for Space Flight. Paris, Pays-Bas: Springer; 2008.
- Baudry P. Aujourd'hui le soleil se lève seize fois. Paris, France: Carrère : M. Lafon; 1985.
- Baudry P. Carnet d'un voyage spatial: histoire d'une aventure dans les étoiles. Bordeaux, France: Elytis; 2007.
- Baudry P. La conquête spatiale en question(s). Bordeaux, France: Elytis; 2012.
- BBC News. Intel plans to tackle cosmic ray threat [Internet]. 2008. Disponible sur: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7335322.stm>
- Bercy P, Tenenbaum H, Klewansky P. Parodontologie: du diagnostic à la pratique. Bruxelles, Belgique: De Boeck université; 1996.
- botanic06.com. La Respiration: De l'organe à la cellule [Internet]. [cité 4 oct 2017]. Disponible sur: <http://www.botanic06.com/site/EvolVie/physio/respi4-2.htm>
- Bradshaw DJ, Lynch RJM. Diet and the microbial aetiology of dental caries: new paradigms. *Int Dent J.* déc 2013;63 Suppl 2:64- 72.
- Brown LR, Wheatcroft MG, Frome WJ, Rider LJ. Effects of a simulated skylab mission on the oral health of astronauts. *J Dent Res.* oct 1974;53(5):1268- 75.
- Burton RR. G-induced loss of consciousness: definition, history, current status. *Aviat Space Environ Med.* janv 1988;59(1):2- 5.
- Canadian Space Agency. Chris Hadfield Brushes his Teeth in Space [Internet]. 2013 [cité 11 mai 2017]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=3bCoGC532p8>
- CBS News. Obama Plans Mission to Mars [Internet]. 2010. Disponible sur: <http://www.cbsnews.com/videos/obama-plans-mission-to-mars/>
- Cervantes JL, Hong B-Y. Dysbiosis and Immune Dysregulation in Outer Space. *Int Rev Immunol.* 2016;35(1):67- 82.
- Chapman S, Ferraro VCA. A new theory of magnetic storms. *Nature.* 26 juill 1930;126(3169):129- 30.
- Cheng X, Xu X, Jing Chen, Zhou X, Cheng L, Li M, et al. Effects of simulated microgravity on Streptococcus mutans physiology and biofilm structure. *FEMS Microbiol Lett.* oct 2014;359(1):94- 101.
- Chossegros C, Varoquaux A, Collet C. Lithiases et sténoses salivaires. [Httpwwwem-Premiumcomdataraitesmb28-67000](http://www.em-premium.com/dataraitesmb28-67000) [Internet]. 23 déc 2016 [cité 5 oct 2017]; Disponible sur: <http://www.em-premium.com.rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/article/1098308/resultatrecherche/2>
- Clément G. Fundamentals of Space Medicine. New York, NY, Etats-Unis d'Amérique; 2011.
- CNES. Qu'est ce que l'impesanteur ? [Internet]. 2015. Disponible sur: <https://cnes.fr/fr/quest-ce-que-limpesanteur>
- CNES. Micropesanteur [Internet]. CNES. 2017 [cité 17 juin 2017]. Disponible sur: <http://cnes-xch.lesitevideo.net/enmicropesanteur/>
- Cogoli A. Voyage vers Mars : aspects médicaux et biologiques. 2008.
- Creer BY, Smedal HA, Wingrove RC. Centrifuge study of pilot tolerance to acceleration and the effects of

- acceleration on pilot performance [Internet]. 1960. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19980223621>
- Da Silva MS, Zimmerman PM, Meguid MM, Nandi J, Ohinata K, Xu Y, et al. Anorexia in space and possible etiologies: an overview. *Nutr Burbank Los Angel Cty Calif*. oct 2002;18(10):805- 13.
- Davenport E, Congdon S, Pierce B. The minimum volumetric requirement of man in space [Internet]. Los Angeles, CA, U.S.A: General Dynamics/Astronautics; 1963. Disponible sur: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1963-250>
- Davis J, éditeur. *Fundamentals of aerospace medicine*. Philadelphia (Pa.), Etats-Unis d'Amérique: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins; 2008.
- Dorman LI. *Cosmic ray interactions, propagation, and acceleration in space plasmas*. Dordrecht, Pays-Bas: Springer; 2006.
- Dréer F. *Conquête spatiale: histoire des vols habités*. Boulogne-Billancourt, France: ETAI; 2007.
- Dupas A. *L'appel du cosmos*. Paris, France: Gallimard, DL 2011; 2011.
- Duyninh T, Orti V, Jame O, Bousquet P, Gibert P. Classification des maladies parodontales. [Httpwwwem-Premiumcomdatatraitessmb28-53216](http://www.em-premium.com/rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/article/1097920/resultatrecherche/1) [Internet]. 22 déc 2016 [cité 5 oct 2017]; Disponible sur: <http://www.em-premium.com/rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/article/1097920/resultatrecherche/1>
- Eiband AM. Human Tolerance to Rapidly Applied Accelerations: A Summary of the Literature [Internet]. 1959 juin. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19980228043>
- ESA. Sélection d'astronautes européens. 2008.
- ESA. ESA FMT 2015 December 14-16, 2015. 2015a.
- ESA. Getting ready for space - Astronaut training. 2015b.
- ESA. La nourriture de l'espace et le réveillon du nouvel an [Internet]. Proxima : Le blog de Thomas Pesquet. 2016 [cité 1 avr 2017]. Disponible sur: <http://blogs.esa.int/thomas-pesquet/fr/2016/12/21/space-food/>
- ESA. Astronaut training [Internet]. European Space Agency. [cité 28 mars 2017]. Disponible sur: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Astronauts
- esa.int. ESA [Internet]. European Space Agency. [cité 6 oct 2017]. Disponible sur: <http://www.esa.int/ESA>
- ESA.int. European Astronaut Selection [Internet]. European Space Agency. [cité 23 mars 2017]. Disponible sur: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/European_Astronaut_Selection
- Europe1.fr. Thomas Pesquet de retour : revivez l'atterrissage de l'astronaute français [Internet]. [cité 4 oct 2017]. Disponible sur: <http://www.europe1.fr/sciences/en-direct-thomas-pesquet-de-retour-suivez-latterrissage-sur-terre-de-lastronaute-francais-vendredi-2-juin-3348521>
- European Space Agency, ESA. Space Station fitness [Internet]. 2017 [cité 6 juill 2017]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?time_continue=157&v=FFMozMtSL3E
- France 3. Interview Patrick Baudry France 3 [Internet]. 2009. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=fKE07FZCnjI>
- Fraser TM. The effects of confinement as a factor in manned space flight. NASA CR-511. NASA contractor report. NASA CR. United States. National Aeronautics and Space Administration; 1966 juill p. 1 - 176.
- Garrel T. *Odontologie et vols spatiaux [Thèse d'exercice]*. [France]: Montpellier; 1995.
- Genevrier F. *Odontologie et missions spatiales [Thèse d'exercice]*. [Lyon, France]: Université Claude Bernard; 2004.
- Golding JF, Paillard AC, Normand H, Besnard S, Denise P. Prevalence, Predictors, and Prevention of Motion Sickness in Zero-G Parabolic Flights. *Aerosp Med Hum Perform*. 1 janv 2017;88(1):3- 9.
- Gouvernement du Canada A spatiale canadienne. L'alimentation dans l'espace [Internet]. Site web de l'Agence spatiale canadienne. 2006 [cité 31 mars 2017]. Disponible sur: <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronautes/vivres-dans-l-espace/alimentation-dans-l-espace.asp>
- Gunepin M, Derache F, Audoual T, Dychter L, Zadik Y, Rivière D. Dentisterie aérospatiale. [Httpswww-Em--Prem-Comfrodon-Biusanteparisdescartesfrdatatraitessmb28-59702](https://www.em-premium.com/rproxy.sc.univ-paris-diderot.fr/article/1098260/resultatrecherche/1) [Internet]. Avril 2013 [cité 24 avr 2017]; Disponible sur: <https://www-em--premium-com.frodon-biusante.parisdescartes.fr/article/1098260/resultatrecherche/1>
- Gunepin M, Derache F, Dychter L, Risso J-J. Implications dentaires des missions spatiales habitées de longue

durée. *Inf Dent*. 20 juill 2016;96(28):86- 91.

Gunepin M, Derache F, Dychter L, Rivière D. Les missions spatiales habitées, un défi pour la dentisterie du XXI^e siècle. *Inf Dent* [Internet]. 23 mai 2012 [cité 1 sept 2016]; Disponible sur: <http://www.information-dentaire.fr/011025-149-Les-missions-spatiales-habitees-un-defi-pour-la-dentisterie-du-XXIe-8239-siecle.html>

Haignéré C, Jonas P, Khayat P, Girot G. Bone height measurements around a dental implant after a 6-month space flight: a case report. *Int J Oral Maxillofac Implants*. juin 2006;21(3):450- 4.

Harman A, Menon A, Watkins S. Disinfection of medical equipment for exploration missions : an assessment of necessity and modalities. Houston, TX, USA: NASA; 2012 déc p. 20. Report No.: S-1134.

Hassler DM, Zeitlin C, Wimmer-Schweiggruber RF, Ehresmann B, Rafkin S, Eigenbrode JL, et al. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover. *Science*. 24 janv 2014;343(6169):1244797.

Homick JL. Space motion sickness. *Acta Astronaut*. oct 1979;6(10):1259- 72.

Horneck G, Facius R, Reichert M, Rettberg P, Seboldt W, Manzey D, et al. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part I: lunar missions. *Adv Space Res Off J Comm Space Res COSPAR*. 2003;31(11):2389- 401.

Ilyin VK. Microbiological status of cosmonauts during orbital spaceflights on Salyut and Mir orbital stations. *Acta Astronaut*. juin 2005;56(9- 12):839- 50.

IRSN. La radioprotection des travailleurs en 2015. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire; 2016 p. 130.

Johnston RS. Biomedical results of Apollo. Washington, Etats-Unis d'Amérique: Scientific and technical information office, National aeronautics and space administration : for sale by the Superintendent of documents, US Government printing office; 1975. (NASA).

Khalatbari A. Les dessous de la ceinture de Van Allen [Internet]. *Sciences et Avenir*. 2014. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/espace/les-dessous-de-la-ceinture-de-van-allen_34384

Komorowski M. Conséquences des capacités thérapeutiques sur le pronostic des pathologies chirurgicales et réanimatoires pouvant survenir au cours des missions habitées d'exploration spatiale [Thèse d'exercice]. [Lille, France]: Université du droit et de la santé; 2013.

Kumar KV, Norfleet WT. Issues on human acceleration tolerance after long-duration space flights [Internet]. 1992. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930020462>

Lasfargues J-J, Colon P. Odontologie conservatrice et restauratrice. Tome 1, Une approche médicale globale. Rueil-Malmaison, France: Éditions CdP; 2009.

Le Monde. La Terre a échappé de justesse à une gigantesque tempête solaire en 2012. *Le Monde.fr* [Internet]. 25 juill 2014 [cité 19 févr 2017]; Disponible sur: http://www.lemonde.fr/sciences/article/2014/07/25/la-terre-a-echappe-de-justesse-a-une-gigantesque-tempete-solaire-en-2012_4462546_1650684.html

Lee AG, Tarver WJ, Mader TH, Gibson CR, Hart SF, Otto CA. Neuro-Ophthalmology of Space Flight. *J Neuro-Ophthalmol Off J North Am Neuro-Ophthalmol Soc*. mars 2016;36(1):85- 91.

Manier O. La conquête de la planète Mars: aspects techniques, médico-psychologiques et éthiques [Thèse d'exercice]. [France]: Université de Caen; 2014.

Manzey D. Human missions to Mars: new psychological challenges and research issues. *Acta Astronaut*. nov 2004;55(3- 9):781- 90.

Marusek JA. Solar storm threat analysis [Internet]. Bloomfield, Indiana: J. Marusek; 2007 p. 29. Disponible sur: <http://breadandbutter-science.com/SSTA.pdf>

Mednieks M, Khatri A, Rubenstein R, Bursleson JA, Hand AR. Microgravity alters the expression of salivary proteins. *Oral Health Dent Manag*. juin 2014;13(2):211- 6.

Menon A. Review of Spaceflight Dental Emergencies [Internet]. 2012 sept. Disponible sur: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120002807>

NASA. ISS Medical Checklist 2001. 2001.

NASA. Living in Space [Internet]. 2004 [cité 11 mai 2017]. Disponible sur: https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/home/F_Living_in_Space.html

NASA. Dental Medical Checklist 2008. 2008a.

NASA. NASA CHeCS. 2008b.

- NASA. What Is Microgravity? [Internet]. NASA. 2010. Disponible sur: <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-microgravity-k4.html>
- NASA. Radiation Measured by NASA's Curiosity on Voyage to Mars has Implications for Future Human Missions [Internet]. 2013 [cité 9 mars 2017]. Disponible sur: https://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/may/HQ_13-165_MSL_Radiation_Findings.html
- NASA, ESA, ASC, Agence spatiale japonaise, Agence spatiale russe. Medical Evaluation Documents (MED) Volume A Medical standards for ISS crewmembers. 2014.
- NASA Food Tech. Le défi de l'alimentation dans l'espace. Commercial Space Center Iowa State University; 2012.
- NASA Johnson. Karen Nyberg Shows How You Wash Hair in Space [Internet]. 2013 [cité 11 mai 2017]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=uljNfZbUYu8
- NASA Johnson. Robonaut Supports Telemedicine Advances [Internet]. 2014 [cité 4 sept 2017]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?time_continue=92&v=9gbfL590Fgg
- nasa.gov. ARED Restrictive exercise in space [Internet]. [cité 11 oct 2017a]. Disponible sur: https://www.nasa.gov/pdf/553871main_AP_ST_Phys_ARED.pdf
- nasa.gov. Site Web officiel de la NASA [Internet]. NASA. [cité 4 oct 2017b]. Disponible sur: <http://www.nasa.gov/index.html>
- Naulin-Ifi C. Traumatismes dentaires: du diagnostic au traitement. Rueil-Malmaison, France: Éditions CdP, impr. 2005; 2005.
- Netter FH. Atlas d'anatomie humaine. Issy-les-Moulineaux, France: Elsevier Masson, impr. 2011; 2011.
- Oman CM. Spacelab experiments on space motion sickness. *Acta Astronaut.* 1987;15(1):55- 66.
- Orsini SS, Lewis AM, Rice KC. Investigation of simulated microgravity effects on *Streptococcus mutans* physiology and global gene expression. *NPJ Microgravity.* 2017;3:4.
- Pagadala S, Tadikonda DC. An overview of classification of dental trauma. *IAIM.* 8 sept 2015;2(9):157- 64.
- Pavy-Le Traon A, Louisy F, Vasseur-Clausen P, Güell A, Gharib C. Contributory factors to orthostatic intolerance after simulated weightlessness. *Clin Physiol Oxf Engl.* sept 1999;19(5):360- 8.
- Pesquet T. Thomas Pesquet (@Thom_astro) | Twitter [Internet]. Twitter. [cité 6 oct 2017]. Disponible sur: https://twitter.com/Thom_astro
- Phillips T. Van Allen Probes Discover a New Radiation Belt [Internet]. 2013. Disponible sur: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/28feb_thirdbelt/
- Phillips T. Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012 | Science Mission Directorate [Internet]. 2014. Disponible sur: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/23jul_superstorm/
- Rai B, Kaur J. The history and importance of aeronautic dentistry. *J Oral Sci.* juin 2011;53(2):143- 6.
- Rai B, Kaur J. Periodontal status, salivary immunoglobulin, and microbial counts after short exposure to an isolated environment. *J Oral Sci.* 2013;55(2):139- 43.
- Rai B, Kaur J, Foing BH. Evaluation by an aeronautic dentist on the adverse effects of a six-week period of microgravity on the oral cavity. *Int J Dent.* 2011;2011:548068.
- Republic of Moldova. JAR-FCL3 [Internet]. 47- 48 avr 26, 2001 p. 416. Disponible sur: http://www.caa.md/files/2014_01/585.pdf
- Rivolier J. L'homme dans l'espace: une approche psycho-écologique des vols habités. Paris, France: Presses universitaires de France, DL 1997; 1997.
- Rogers S. Nasa budgets: US spending on space travel since 1958 UPDATED [Internet]. the Guardian. 2010. Disponible sur: <http://www.theguardian.com/news/datablog/2010/feb/01/nasa-budgets-us-spending-space-travel>
- Rouat S. Thomas Pesquet sur l'ISS : « C'est une expérience hors du commun qui m'attend ! » [Internet]. Sciences et Avenir. 2016 [cité 31 mars 2017]. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/espace/exploration/thomas-pesquet-sur-l-iss-c-est-une-experience-hors-du-commun-qui-m-attend_104991
- Science At NASA. ScienceCasts: Carrington-class CME Narrowly Misses Earth [Internet]. 2014 [cité 6 avr 2017]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=7ukQhycKOFw>
- Siffre M, Bourcart J, Bleustein-Blanchet M. Hors du temps: l'expérience du 16 juillet 1962 au fond du gouffre de Scarasson par celui qui l'a vécue. Paris, France: R. Julliard; 1963.

- Simon M, Whitmire A, Otto C, Neubek D. Factors impacting habitable volume requirements: Results from the 2011 Habitable Volume Workshop [Internet]. 2011 p. 72. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110023287>
- Société française de médecine aérospatiale. Médecine aérospatiale. Colin J, Timbal J, éditeurs. Paris, France: Expansion scientifique française; 1999.
- Sonnenfeld G, Butel JS, Shearer WT. Effects of the space flight environment on the immune system. *Rev Environ Health*. mars 2003;18(1):1- 17.
- Sparrow G, Haigneré J-P, Aldrin EE. *La conquête de l'espace*. Paris, France: Flammarion; 2008.
- Stephan RM. Changes in hydrogen ion concentration on tooth surfaces and in carious lesions. *J Am Dent Assoc*. 1 mai 1940;27(5):718- 23.
- Stuster J. *Bold endeavors: lessons from polar and space exploration*. Annapolis, Md., Etats-Unis d'Amérique: Naval Institute Press; 1996.
- Vico L, Van Rietbergen B, Vilayphiou N, Linossier M-T, Locrelle H, Normand M, et al. Cortical and trabecular bone microstructure did not recover at weight-bearing skeletal sites and progressively deteriorated at non-weight-bearing sites during the year following International Space Station missions. *J Bone Miner Res Off J Am Soc Bone Miner Res*. 2 juin 2017;
- Wang L, Zhang D, Dong W. Study on space motion sickness before, during and after spaceflight. *Hang Tian Yi Xue Yu Yi Xue Gong Cheng Space Med Med Eng*. oct 2003;16(5):382- 6.
- Wang LJ, Liu ZQ, He M, Ren W. Effects of adaptive changes of vestibular system on cardiovascular regulation and orthostatic tolerance. *Hang Tian Yi Xue Yu Yi Xue Gong Cheng Space Med Med Eng*. juin 2001;14(3):225- 9.
- Williams D, Kuipers A, Mukai C, Thirsk R. Acclimation during space flight: effects on human physiology. *CMAJ Can Med Assoc J J Assoc Medicale Can*. 23 juin 2009;180(13):1317- 23.
- Woods WD. *How Apollo flew to the Moon*. Springer. New York, Etats-Unis d'Amérique, Pays-Bas, Allemagne; 2011.
- Zell H. Van Allen Probes Discover a Surprise Circling Earth [Internet]. 2015a. Disponible sur: http://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/news/third-belt.html
- Zell H. Van Allen Probes Spot an Impenetrable Barrier in Space [Internet]. NASA. 2015b. Disponible sur: <http://www.nasa.gov/content/goddard/van-allen-probes-spot-impenetrable-barrier-in-space>
- Zimmermann D. Interview: Extracting a tooth should be the last resort in space. *Dental Tribune International* [Internet]. 1 mars 2013 [cité 1 sept 2016]; Disponible sur: http://www.dental-tribune.com/articles/news/americas/12838_interview_extracting_a_tooth_should_be_the_last_resort_in_space.html
- Zubek JP. *Sensory deprivation: fifteen years of research*. New York, Etats-Unis d'Amérique: Appleton-Century-Crofts,; 1969.

Index des illustrations

Figure 1 : à gauche : Photographie de Youri Gagarine ; à droite : Une du Huntsville Times (nasa.gov)	5
Figure 2 : Photographie de Neil Armstrong sur la Lune au cours de la mission Apollo 11 (nasa.gov)	6
Figure 3 : Station Spatiale Internationale en 2014 (nasa.gov)	7
Figure 4 : Rover Curiosity sur le sol martien en 2012 (nasa.gov)	8
Figure 5 : Schéma des ceintures de Van Allen (nasa.gov)	11
Figure 6 : Ceintures de Van Allen (nasa.gov).....	12
Figure 7 : Illustration d'une éjection de masse coronale et son impact sur la Terre. Les objets représentés ne sont pas à l'échelle (esa.int).....	13
Figure 8 : Photo postée sur Twitter par le spationaute Thomas Pesquet en décembre 2016, avec comme commentaire : « Ma cabine : mon seul espace privé dans toute l'ISS » (T. Pesquet).....	17
Figure 9 : Volume nécessaire par membre d'équipage en fonction de la durée de la mission (Simon et al. 2011)	18
Figure 10 : Réhydratation à l'eau chaude d'aliments lyophilisés (nasa.gov)	25
Figure 11 : Thomas Pesquet montrant le repas du nouvel an cuisiné par Thierry Marx conditionné sous forme de conserves (ESA 2016).....	26
Figure 12 : Schéma de Keyes.....	27
Figure 13 : Courbe de Stephan. Effet d'un bain de bouche contenant 10% de glucose sur l'abaissement local du pH (Lasfargues et Colon 2009).....	28
Figure 14 : Astronautes Culbertson et Bursch se brossant les dents dans la navette spatiale Discovery (nasa.gov)	30
Figure 15 : Astronaute McArthur se brossant les dents à bord de la navette spatiale Atlantis (nasa.gov).....	31
Figure 16 : Dessin représentant l'aspect visage bouffie et mollets de coq des astronautes (Agence Spatiale Canadienne)	34
Figure 17 : L'astronaute Thomas Pesquet à son retour sur Terre (Europe1.fr)	35
Figure 18 : Schéma des volumes respiratoires (botanic06.com)	36
Figure 19 : Planche anatomique représentant le système vestibulaire (Netter 2011)	37
Figure 20 : Fond d'œil avant et après un vol spatial de longue durée montrant l'apparition d'un œdème du disque optique.....	39
Figure 21 : IRM montrant l'aplatissement en postérieur du globe oculaire.	39
Figure 22 : Fond d'œil mettant en évidence les plis choroïdaux	39
Figure 23 : IRM comparant les volumes contenus dans la gaine optique (a) et les ventricules cérébraux (b) avant et après une mission spatiale de longue durée (Alperin et al. 2017).....	40
Figure 24 : Astronaute américaine Sunita Williams courant sur le tapis de course à bord de l'ISS en 2007 (nasa.gov)	43
Figure 25 : Astronaute Canadien Robert Thirsk s'entraînant sur la machine de musculation ARED à bord de l'ISS (nasa.gov).....	43
Figure 26 : Plants de salade romaine en culture à bord de l'ISS (nasa.gov).....	44
Figure 27 : Illustrations des « futures » cultures sur Mars (nasa.gov).....	45
Figure 28 : Course sous gravité artificielle (« 2001 l'odyssée de l'espace », 1968)	47
Figure 29 : Représentation schématique des 5 stades d'évolution des lésions carieuses selon le concept Si/Sta (Lasfargues et Colon 2009).....	50
Figure 30 : Schéma des fractures dentaires selon la classification d'Ellis simplifié pour les astronautes (Barratt et al. 2008)	52
Figure 31 : Croissance et résistance des Streptococcus mutans (Cheng et al. 2014).....	59

Figure 32 : Structure du biofilm (Cheng et al. 2014).....	60
Figure 33 : Equilibre microbiologique (Cheng et al. 2014).....	61
Figure 34 : Couverture du Medical Checklist présent à bord de l'ISS en 2001 (NASA 2001).....	65
Figure 35 : Un astronaute s'entraîne à l'extraction d'une dent sur un fantôme (nasa.gov).....	66
Figure 36 : Photos et schéma des techniques d'anesthésie dans le Medical Checklist (NASA 2008a).....	67
Figure 37 : Schémas du montage d'une seringue d'anesthésie dans le Medical Checklist (NASA 2008a).....	67
Figure 38 : Trousse de soins dentaire en haut à droite sur la photo (NASA 2008b).....	68
Figure 39 : Examen bucco-dentaire de l'astronaute Charles Conrad Jr par le CMO Joseph Kerwin dans le Skylab 2 le 22 juin 1973 (nasa.gov).....	69
Figure 40 : Tableau 1 du Medical Checklist récapitulant l'administration d'antibiotiques à bord de l'ISS. (NASA 2008a).....	72
Figure 41 : Tableau 2 du Medical Checklist relatif aux antalgiques de niveau 2 (NASA 2008a).....	72
Figure 42 : Tableau 3 du Medical Checklist référant les antalgiques pour les douleurs sévères (NASA 2008a) ..	73

Les opinions émises dans les dissertations présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, sans aucune approbation ni improbation de la Faculté de Chirurgie Dentaire.

RESUME en anglais :

Manned space missions are on the rise. Important projects are emerging leading to new issues, mainly of a medical nature. No crew has yet stayed in space as long as a trip to Mars would require. What will be the role of dentistry through these space flights?

Answer to this question will be provided by describing the astronauts' selection *criteria* and their daily life during space missions, through bibliography and the analysis of space agency documentation.

Extending the length of missions increases the risk of general and dental diseases. It is possible to minimize this risk thanks to preventive initiatives, training of the crew and all material available on board.

Knowledge in space dentistry in terms of prevention combined with media coverage of space missions could have a positive public health impact by improving oral hygiene, especially among youngest.

This work was completed with interviews of key actors in European space medicine giving an overview of current space dentistry.

BOURGEOIS Timothée. **Odontologie au cours des missions spatiales habitées : revue narrative.** 2017. 94 p. : ill., graph., tabl.
Réf. Biblio. : 88-92.

Sous la direction des Docteur Catherine MESGOUEZ et Docteur Brigitte GODARD

Th : Chir Dent. : Paris 7 : année 2017

RESUME :

Les missions spatiales habitées connaissent un nouvel essor. De grands projets voient le jour entraînant de nouvelles contraintes principalement d'ordre médical. Aucun équipage n'est encore resté dans l'espace aussi longtemps que ne le nécessiterait un voyage vers Mars. Quelle sera la place de l'Odontologie au cours de ces vols spatiaux ?

Une revue de la littérature et l'analyse de documents provenant des agences spatiales permettent de répondre à cette question par la description des conditions de sélection des astronautes et de la vie quotidienne durant les missions.

L'allongement de la durée des missions augmente le risque de survenue de pathologies générales et dentaires. Les mesures préventives mises en place, la formation de l'équipage et le matériel présent à bord permettent de limiter ces risques aux conséquences désastreuses pour la réussite de la mission.

Les connaissances apportées par l'Odontologie Spatiale en termes de Prévention et la médiatisation des missions pourraient avoir un impact positif en Santé Publique en aidant à l'amélioration de l'hygiène bucco-dentaire, notamment chez les plus jeunes.

Ce travail a été complété par les interviews de personnalités marquantes de la Médecine Spatiale européenne qui ont permis de faire un bilan de l'Odontologie Spatiale actuelle.

TITRE en anglais : Odontology during manned space missions : narrative review

DISCIPLINE : Odontologie conservatrice-endodontie

MOTS-CLES : odontologie, vol spatial, soins dentaires, prévention, formation, régime alimentaire, hygiène bucco-dentaire, physiologie, astronaute

MeSH : dentistry, space flight, dental care, preventive medicine, training, diet, oral hygiene, physiology, astronauts

BOURGEOIS *Timothée*

**ODONTOLOGIE AU COURS DES MISSIONS SPATIALES
HABITEES : REVUE NARRATIVE**

PARIS 7

2017