



HAL
open science

Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport des technologies numériques

Léonie Maujean

► **To cite this version:**

Léonie Maujean. Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport des technologies numériques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03449892

HAL Id: dumas-03449892

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03449892v1>

Submitted on 25 Nov 2021

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



AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2 - L 335.10



UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DE SANTÉ
UFR D'ODONTOLOGIE - MONTROUGE

Année 2021

N° M001

THÈSE
POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 07 Janvier 2021

Par

Léonie MAUJEAN

**Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport des
technologies numériques**

Dirigée par Mme le Dr Margaux Hinet

JURY

M. le Professeur Louis Maman
M. le Docteur Philippe Tramba
M. le Docteur Nicolas Eid
M. le Docteur Thibaud Drouhet
Mme le Docteur Margaux Hinet

Président
Assesseur
Assesseur
Assesseur
Invité



Remerciements

À M. le Professeur Louis Maman, Docteur en Chirurgie dentaire, Spécialiste qualifié en Chirurgie orale, Docteur en Sciences odontologiques, Docteur de l'Université Paris Descartes, Habilité à diriger des Recherches, Professeur des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge, Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris, Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Pour m'avoir fait l'honneur de presider ce jury de thèse d'exercice. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de mon profond respect et de mes sincères salutations.

À M. le Docteur Philippe Tramba, Docteur en Chirurgie dentaire, Docteur de l'Université Paris Descartes, Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge, Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de siéger dans ce jury. Merci pour la disponibilité et la générosité qui ont ponctué vos enseignements au cours de mon cursus hospitalier. Veuillez trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

À M. le Docteur Nicolas Eid, Docteur en Chirurgie dentaire, Docteur de l'Université Paris Descartes, Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge, Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de siéger dans ce jury. Je vous remercie pour votre implication dans notre cursus universitaire ainsi que pour la qualité de vos enseignements. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de ma reconnaissance.

À M. le Docteur Thibaud Drouhet, Docteur en Chirurgie dentaire, Assistant Hospitalo-Universitaire, UFR d'Odontologie - Montrouge

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de siéger dans ce jury. Merci pour la patience et la disponibilité qui ont été au centre de votre pédagogie au cours de mon cursus hospitalier. Veuillez trouver dans cette thèse l'expression de mes remerciements.

À Mme le Docteur Margaux Hinet, Docteur en Chirurgie dentaire

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse. Je souhaite vous remercier pour la qualité et la rigueur de vos enseignements, qui ont pris dans mon cursus la forme d'une transmission bienveillante. Veuillez trouver dans cette thèse l'expression de ma gratitude.

Résumé et indexation en français et anglais

Résumé :

Alors que les innovations technologiques révolutionnent déjà la dentisterie terrestre à travers l'avènement du numérique et la dématérialisation de notre pratique, il apparaît que leurs applications sont également plus que jamais d'actualité en odontologie spatiale. En effet, l'inexorable désir d'expansion et de découverte de l'Homme le pousse aujourd'hui à la découverte (et la conquête) de nouveaux espaces : 50 ans après le « grand pas pour l'humanité » de Neil Armstrong et Buzz Aldrin sur la surface lunaire, il s'agit désormais de poser le pied sur une véritable planète : Mars. La durée exceptionnelle de ces futures missions (plus de deux ans) en microgravité avec une impossibilité de retour sur Terre en cas d'urgence, ainsi qu'une communication avec l'équipe médicale au sol parfois impossible, pousse à envisager l'utilisation d'autres technologies. Le paradigme de la dentisterie aérospatiale doit aujourd'hui évoluer avec le changement de nature des missions : un dépistage méticuleux des spationautes en pré-vol, avec l'aide d'outils diagnostiques comme les caméras équipées de laser à fluorescence ou la trans-illumination, semblent plus que jamais pertinents. C'est également en vol que devront être embarqués les moyens d'une prise en charge plus complète : caméra intra-orale pour empreinte optique, système d'imagerie portable, dispositif de photographie, imprimante 3D, ou encore le recours à la télé-médecine.

Discipline ou spécialité :

Santé publique et prévention

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

fMeSH : Télé-médecine ; Environnement extraterrestre

Rameau : CFAO, Systèmes de ; Vol spatial habité

Forme ou Genre :

fMeSH : Dissertation universitaire

Rameau : Thèses et écrits académiques

Abstract:

Meanwhile dentistry is already undergoing drastic changes through the digitalization of most of its processes, it appears that digital technologies also play a bigger role than ever in aerospace dentistry. Indeed, mankind's insatiable desire of expansion is leading us to discovering (and conquering?) new lands. 50 years after Neil Armstrong and Buzz Aldrin's "giant leap for mankind" on the Moon's surface, it is now time to take a step on a real planet: Mars. These longlasting missions (more than two years) in microgravity combined with the impossibility of going back to Earth in case of emergency, led scientific experts to question the use of new technologies. The paradigm of aerospace dentistry must now evolve following the change in the nature of missions: a meticulous pre-flight screening of astronauts, using diagnostic tools such as intra-oral cameras equipped with fluorescence laser seem, more than ever, crucial. Further technologies will also need to be onboarded to allow a much complete care: intra-oral cameras for digital impressions, portable x-ray machines, 3D printers, and telemedicine installations.

Branches or specialty:

Public Health and Prevention

English keywords (MeSH):

Computer-Aided Design ; Extraterrestrial Environment

Publication type (MeSH):

Academic Dissertation

Table des matières

INTRODUCTION	3
1 : ENJEUX D'UNE MISSION INTERPLANETAIRE	5
1.1 APPROCHES ET MODELISATION DES MISSIONS : LES PROJETS PLAUSIBLES.....	5
1.1.1 <i>Présentation et caractéristiques de Mars</i>	5
1.1.2 <i>Historique de l'exploration de Mars</i>	7
1.1.3 <i>Justification de l'envoi de l'Homme</i>	9
1.1.4 <i>Missions d'exploration scientifique : agences spatiales internationales</i>	10
1.1.5 <i>Colonisation de Mars : Space X et l'ambition d'Elon Musk</i>	11
1.2 CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES D'UNE MISSION INTERPLANETAIRE.....	15
1.2.1 <i>Durée</i>	15
1.2.2 <i>Alimentation</i>	16
1.2.3 <i>Rayonnement cosmique</i>	19
1.2.4 <i>Communication avec la Terre</i>	20
1.3 CONSEQUENCES METABOLIQUES DE LA MICROGRAVITE.....	21
1.3.1 <i>Atteintes osseuses</i>	21
1.3.2 <i>Atteintes musculaires</i>	22
1.3.3 <i>Atteintes cardiovasculaires</i>	22
1.4 CONSEQUENCES DENTAIRES ET RISQUES	23
1.4.1 <i>Risque infectieux</i>	23
1.4.2 <i>Facteur mécanique</i>	26
2 : TECHNOLOGIES NUMERIQUES ET DENTISTERIE MODERNE	29
2.1 CHAINE CFAO : PRINCIPE, APPLICATIONS ET INTEROPERABILITE.....	29
2.1.1 <i>Numérisation</i>	29
2.1.2 <i>Conception assistée par ordinateur</i>	30
2.2 OUTILS DE DIAGNOSTICS NUMERIQUES	32
2.2.1 <i>Fluorescence et trans-illumination</i>	32
2.2.2 <i>Radiographie</i>	33
2.2.3 <i>Photographie</i>	35
2.3 TELEMEDECINE BUCCO-DENTAIRE	37
3 : DENTISTERIE SPATIALE ASSISTEE NUMERIQUEMENT : NECESSITE OU UTOPIE ?	40
3.1 PRISE EN CHARGE BUCCO-DENTAIRE ACTUELLE DES SPATIONAUTES.....	40
3.1.1 <i>Pré-vol</i>	40
3.1.2 <i>Per-vol</i>	45

3.2 CHAMP D'APPLICATION DES TECHNOLOGIES NUMERIQUES DANS L'ESPACE.....	56
3.2.1 <i>Diagnostic</i>	56
3.2.2 <i>Traitement</i>	60
3.3 GESTION DU FACTEUR HUMAIN.....	64
3.3.1 <i>Sélection et suivi pré-vol renforcés</i>	64
3.3.2 <i>De technicien à praticien semi-dépendant</i>	64
3.3.3 <i>Protocole de prise en charge d'urgence simulé</i>	64
CONCLUSION	68
BIBLIOGRAPHIE	69
TABLE DES FIGURES	74

Introduction

« L’astronomie est née de la superstition ; la géométrie de l’avarice ; la physique d’une vaine curiosité ; toutes et la morale même, de l’orgueil humain » Jean-Jacques Rousseau¹.

Si l’expansionnisme a longtemps été attribué à des contextes religieux, nationaux ou à certains despotes, la conquête de l’espace met en lumière l’universalité de cet attrait au sein de l’espèce humaine.

Depuis l’alunissage de Neil Armstrong et Buzz Aldrin sur le satellite terrestre en 1969, l’appréhension intellectuelle de l’Homme limité au sein de l’atmosphère terrestre s’est peu à peu estompée dans l’imaginaire collectif, au profit d’ambitions extraordinaires. Nourrit par la fiction et la nostalgie d’une présence éventuelle d’autre forme de vie dans l’univers, les différentes agences spatiales ont, dès les années 1960, envoyé des sondes d’exploration sur une véritable planète : Mars.

L’Homme tend naturellement vers ce qui lui est le plus semblable, et cela même dans la découverte et l’appropriation de l’inconnu. Mars est la deuxième planète la plus proche de la Terre dans le système solaire (après Vénus), et surtout celle dont les caractéristiques s’en rapprochent le plus. À échelle de vie et de compétences humaines, elle est donc atteignable.

Cette évolution du paradigme de la place de l’Homme au sein de l’Univers coïncide avec celle de la perception que nous avons de nous-même, illustrée par l’avènement du numérique dans tous les aspects de notre vie, et notamment en dentisterie. Du diagnostic à la fabrication de prothèses fonctionnelles, les avancées technologiques forment désormais un maillon possiblement ininterrompu dans tous types de pratiques, spécialisées ou non.

La démocratisation de ces technologies coûteuses s’opérant progressivement sur Terre, la durée (deux ans et demi) et les conditions exceptionnelles (en l’absence quasi-complète de gravité) questionnent la nécessité de leur utilisation dans le cadre d’une mission vers Mars : le maintien de la santé bucco-dentaire des spationautes est directement corrélé au bon déroulement de la mission. Cette durée justifiera l’élargissement du champ d’application de la dentisterie au-delà de la simple prévention en amont des vols et de la trousse d’urgence basique déjà présente dans les missions courtes : des outils de diagnostic (dépistage des pathologies carieuses, parodontales ou infectieuses) et de traitements

¹ Rousseau, *Discours sur les sciences et les arts*.

(remplacement d'une restauration, avulsion, éviction carieuse...) devront être embarqués au sein des vaisseaux. Le personnel devra également être apte à réaliser ces actes.

L'intégration et l'adaptation de technologies numériques adaptées aux vaisseaux spatiaux serait-il alors la solution de choix pour assurer le maintien de la santé bucco-dentaire des spatonautes durant plusieurs années ?

Après une description des caractéristiques et des enjeux de l'environnement spatial lors des missions interplanétaires grâce aux ressources fournies par les acteurs publics (agences spatiales) et privés (Space X) à l'origine de ces projets, ainsi que de l'état de l'art du numérique en dentisterie moderne, nous étudierons la corrélation possible entre les deux.

1 : Enjeux d'une mission interplanétaire

1.1 Approches et modélisation des missions : les projets plausibles

1.1.1 Présentation et caractéristiques de Mars

Il convient d'abord d'éclaircir l'interrogation suivante : pourquoi Mars ?

C'est à plus de 4000 ans que remontent ses premières observations par la civilisation égyptienne qui la nommaient « Horus la Rouge », précèdent les Grecs qui l'associèrent ensuite à la divinité de la Guerre.²

Malgré l'entretien d'une image quasi-mystique de Mars par de nombreuses fictions (de « *Vingt-quatre heures chez les martiens* » de Neumann au récent « *Seul sur Mars* » de Ridley Scott), l'intérêt actuel porté à la planète rouge est bien éloigné des considérations ésotériques d'autrefois.

Bien que la démarche intellectuelle modélisant la conquête de Mars soit développée selon une échelle spatiale, la première préoccupation pour une mission interplanétaire habitée est celle de la temporalité humaine : Mars est la quatrième planète par ordre de proximité avec le Soleil (juste derrière la Terre), dont elle est éloignée de 229 millions de kilomètres. La proximité d'orbites des deux planètes par rapport au Soleil permet de les rejoindre en un voyage de quelques mois.

Figure 1 : Modélisation du Système solaire par ordre de proximité au Soleil



Source : Schoolmouv, fiche de cours « La Terre et le système Solaire », 2019.

² Marchand, « Objectif Mars : à quand des hommes sur la planète rouge ? »

Ces proximités similaires au Soleil permettent d'établir un parallèle entre les deux planètes selon certains paramètres : l'écart de température à la surface de Mars, qualifiée d'hyper-continentale (-140°C à +30°C avec une température moyenne de -63°C) se situe sur une échelle compatible avec la vie humaine. Quatre saisons (plus longues que sur Terre) s'y succèdent également.

Enfin, si une année sur Mars (période de révolution totale autour du Soleil) dure presque le double de celle de la Terre (687 jours), les journées y sont de 24 heures et 40 minutes, en adéquation avec le rythme circadien de l'Homme.³

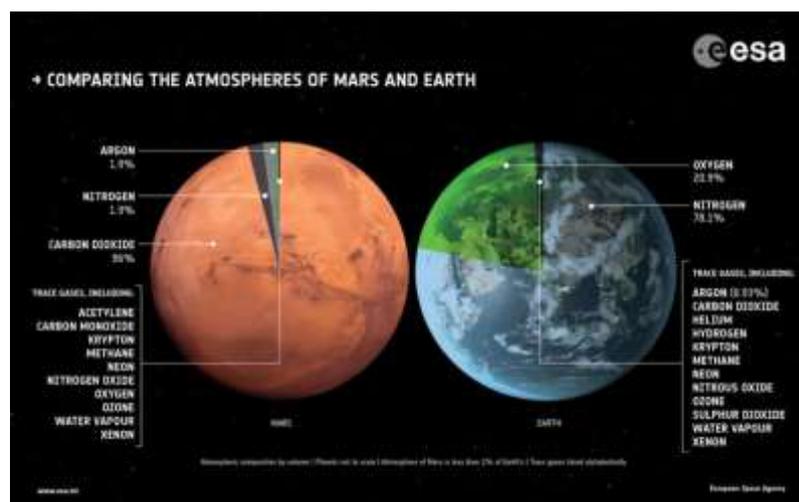
La dynamique de la planète semblant ainsi globalement adaptée au rythme humain, ses caractéristiques intrinsèques sont-elles réellement compatibles avec la survie de notre espèce à sa surface ?

La lumière nécessaire à la vie étant apportée par le Soleil, la possibilité d'une installation sur Mars est corrélée à la présence de trois facteurs : l'eau, la nourriture et l'air.

On sait grâce aux explorations permises par les missions inhabitées sur Mars que la planète possède suffisamment d'eau (majoritairement sous forme de glace contenue dans les calottes polaires) pour créer nuages dans le ciel, pluie et lacs en surface.

Elle possède cependant un atmosphère cent fois moins dense que l'atmosphère terrestre : la pression y est incompatible avec la vie humaine sans combinaisons spatiales pressurisées, et la gravité y est trois fois moins importante que sur Terre ; il n'y a pas non-plus de couche d'ozone (les quantités d'ozone et de vapeur d'eau étant actuellement insuffisantes pour arrêter les rayons solaires).

Figure 2 : Comparaison qualitative et quantitative des atmosphères martien et terrestre



Source : European space agency, « Why go to Mars ? », 2020.

³ National aeronautics and space administration, « Communications with Earth on NASA's Mars exploration program ».

La composition de l'air sur Mars, bien qu'en qualité semblable à celui de la Terre, ne l'est absolument pas en ce qui concerne les proportions de ses éléments : rappelons que la densité atmosphérique y est très faible, et bien que majoritairement constitué de CO₂, cette quantité est trop faible pour créer une couche suffisamment épaisse et filtrante pour permettre à l'Homme d'y vivre.

Le nitrogène est le composant majeur de l'air sur Terre : il représente moins de 2 % de l'air sur Mars, malgré les faibles quantités décelées dans le sol par le rover « Curiosity » (0,03 % par échantillon de masse prélevée). Cependant, il faudra encore une fois en connaître la quantité totale potentiellement disponible avant d'y envisager une installation.⁴

1.1.2 Historique de l'exploration de Mars

L'intérêt porté à la planète a naturellement mené les hommes de son observation à la volonté de l'explorer : les missions inhabitées ont débuté dans les années 1960, révélant sa difficulté d'accès malgré sa proximité relative avec la Terre ; plus de la moitié des missions lancées vers Mars ont échoué. Les années 60 et débuts 70 ont principalement consisté en la mise en place d'orbiteurs et d'un premier atterrisseur par les États-Unis et l'Union Soviétique.

C'est au milieu des années 1970 que l'exploration de Mars prend un nouveau tournant : deux missions jumelles sont lancées par la NASA et JPL, « *Viking 1 et 2* », comprenant toutes deux un orbiteur et un atterrisseur. Ce sont les photos prodiguées par ces deux missions qui ont permises d'établir 97 % de la cartographie de surface de la planète.

L'exploration de la planète rouge a ensuite été mise sur pause pendant une vingtaine d'années (à l'exception de quelques missions américaines et soviétiques non-abouties), jusqu'en 1996 avec le lancement par la NASA et JPL de la mission « Mars Global Surveyor » qui entra en orbite autour de Mars l'année suivante. L'agence spatiale américaine lance la même année « Mars Pathfinder », déposant le petit véhicule spatial « Sojourner » qui en sillonne la surface aride pendant plusieurs semaines.

En 2001, « Mars Odyssey » parvient à se placer dans l'orbite martienne, permettant une observation de la planète dans son ensemble. D'autres sondes se sont posées avec succès en 2003 et 2004 (« Mars Express » par l'Agence Spatiale Européenne, « Spirit » et « Opportunity » par la NASA). Les États-Unis poursuivent sur leur lancée en 2005 avec le « Mars Reconnaissance Orbiter », toujours opérationnel

⁴ Marinova, McKay, et Hashimoto, « Radiative-convective model of warming Mars with artificial greenhouse gases ».

aujourd'hui (ayant notamment permis de collecter des informations sur la surface, sub-surface et l'atmosphère de Mars).⁵

En 2012, le devenu célèbre « Curiosity », rover de 900 kg toujours opérationnel, atterrit à la surface de la planète rouge. Équipé de bras articulés au bout desquels sont suspendues des fraises rotatives lui permettant de creuser le sol, il a prélevé des échantillons de surface au fur-et-à-mesure de sa progression. Il est entre autres à l'origine de la détection de méthane ainsi que de plâtre, témoin de la présence de molécules organiques à la surface de Mars.

D'autres missions d'agences spatiales internationales (Russie, Europe, Inde) ont été entreprises les années suivantes afin de mettre en place des orbiteurs autour de la planète.

Figure 3 : Selfie du robot "Curiosity" à l'étuve de Glen sur Mars, le 11 Octobre 2019.



Source : National aeronautics and space administration, « Mars curiosity », 2019.

Enfin, la NASA lance sa dernière mission en date en 2018 : le rover « In sight », destiné à explorer en profondeur la surface de Mars : équipé d'un sismomètre, d'un magnétomètre ainsi que d'une sonde thermique, il monitore en temps réel les constantes de la planète. Il a ainsi révélé que les évènements sismiques y sont bien plus fréquents que sur Terre, mais beaucoup plus légers. Aussi, Mars n'a pas de plaque tectonique, mais possède néanmoins une activité volcanique.

La décennie 2020 consistera en l'envoi d'autres rovers d'exploration (« Exo Mars », collaboration entre la Russie et l'Europe ; « Mars 2020 » lancé par la NASA afin de chercher des traces éventuelles de vie

⁵ European space agency, « Histoire de l'exploration de Mars ».

et collecter des échantillons renvoyés sur Terre pour être analysés). Tous ces travaux sont orientés vers l'objectif, à l'horizon 2030, d'envoyer les premiers hommes sur Mars.⁶

1.1.3 Justification de l'envoi de l'Homme

Si l'environnement y est si hostile et l'accès incertain, pourquoi l'ensemble des agences spatiales (ainsi que certains acteurs privés) souhaitent y envoyer des missions habitées ?

Il est d'abord évident que la conquête spatiale sur fond politique est un des objectifs premiers de l'aéronautique depuis ses débuts : la course à l'espace qui a mené aux premiers pas de l'Homme sur la Lune s'est effectivement déroulée sur fond de Guerre Froide, où les États-Unis et l'URSS déployaient successivement des moyens conséquents à destination du satellite terrestre, afin d'asseoir leur hégémonie sur leur ennemi, et sur le monde. L'envergure d'une mission habitée vers Mars nécessitera une collaboration entre différents acteurs (donc probablement internationale), mais une dimension nationaliste demeure tout de même au centre des projets menés par les différentes agences spatiales. Thomas Pesquet, spationaute français de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), affirmait en mars 2020 qu'il rêvait de « poser le pied sur Mars », alors qu'il se prépare pour une prochaine mission sur la Station Spatiale Internationale (ISS) en 2021.⁷

Une présence humaine dans le cadre de missions d'exploration présenterait de multiples avantages : le pilotage des robots d'exploration sur place et une réduction du temps de latence actuel (plusieurs dizaines de minutes pour transmettre une information jusqu'à la Terre), ainsi que la prise de mesures plus précises et l'analyse directe d'échantillons collectés sur place. D'un point de vue scientifique, différents domaines connaîtraient des avancées significatives, par exemple :

- L'astrobiologie, avec possiblement la réponse aux questions d'origine et d'évolution de la vie, ainsi que l'évaluation de la viabilité de cette destination pour la survie de l'humanité.
- La géologie, en comprenant mieux la genèse et l'évolution de la planète (grâce à des études visuelles plus poussées et des prélèvements directs plus représentatifs).

Plus généralement, le succès d'une mission habitée vers Mars permettrait des progrès techniques globaux pour l'humanité, grâce aux défis résolus pour la réalisation du projet.⁸

⁶ European space agency, « Robotic exploration of Mars ».

⁷ Jérôme, « Thomas Pesquet : « Je rêve de poser le pied sur Mars » ».

⁸ National aeronautics and space administration, « Communications with Earth on NASA's Mars exploration program ».

1 .1.4 Missions d'exploration scientifique : agences spatiales internationales

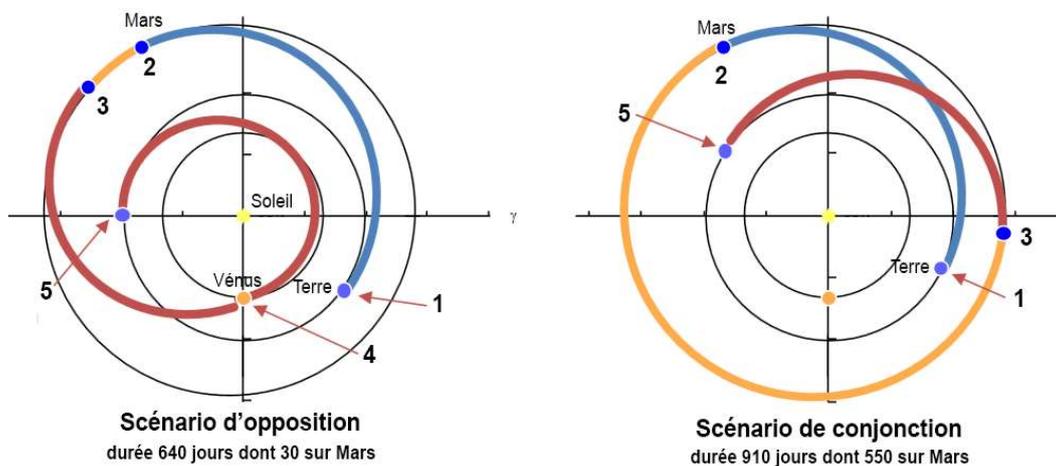
Les agences spatiales ont un but commun pour l'horizon 2030 (la NASA l'ayant prévu pour 2033) : lancer une mission d'exploration habitée vers Mars avec retour sur Terre.

Afin de s'y préparer, la NASA enverra en juillet 2020 le rover « Perseverance » qui aura pour objectif de déterminer le lieu d'atterrissage le plus intéressant scientifiquement, mais également en termes de survie pour l'Homme en permettant l'acheminement de ressources vitales comme l'eau.

Le paramètre déterminant d'une mission habitée vers Mars, en comparaison d'une expédition lunaire – et l'enjeu majeur de notre appréhension de la prise en charge en charge dentaire des spationautes – est sa durée : selon le modèle choisi, elle varierait de 390 jours à 910 jours (soit 2 ans et 6 mois).

En fait, c'est la trajectoire de vol qui est le paramètre déterminant de la durée totale de la mission. Les positions relatives de Mars et de la Terre permettent un alignement n'offrant qu'une fenêtre de lancement tous les deux ans. Alors que le trajet aller fait consensus (d'un total de 180 jours au moment d'un « rendez-vous » Terre-Mars), le trajet retour, et donc la durée de séjour des spationautes sur la planète rouge, fait l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique. À ce propos, deux modèles sont en discussion : le modèle d'*opposition* et le modèle de *conjonction*.

Figure 4 : Schéma explicatif des deux modèles de trajectoire discutés pour un vol habité vers Mars.



Source : Drake et Watts, « Human exploration of Mars design reference architecture 5.0 », 2014.

Le scénario d'opposition s'étendrait sur une durée totale (voyage inclus) de 640 jours : l'équipe resterait 30 jours sur Mars. Le voyage retour constituerait la majeure partie de la durée de la mission (430 jours), et nécessiterait l'assistance gravitationnelle de Vénus pour revenir sur Terre.

Le scénario de conjonction serait beaucoup plus long (910 jours au total) : le séjour sur Mars (550 jours) constituerait la majeure partie de la mission. Le retour serait égal à l'aller (180 jours) et correspondrait à la fenêtre suivante de rencontre Terre-Mars.

Pour des raisons de durée minimale d'exploration scientifique (30 jours serait trop court), ainsi que de sécurité dans le trajet de retour (dépendre de Vénus pour assurer une trajectoire correcte maximise les risques), c'est le scénario de conjonction qui est favorisé par la communauté scientifique. Ainsi, les spationautes resteront deux ans et demi sans assistance médicale directe ni possibilité de revenir sur Terre en cas d'urgence.⁹

1.1.5 Colonisation de Mars : Space X et l'ambition d'Elon Musk

N.B : cette sous-partie sort quelque peu du cadre stricto sensu de cette thèse (cantonnée au cadre des missions d'explorations habitées à durée limitée sur Mars) mais nous avons choisi de la conserver, car l'éviter serait selon nous passer à côté de l'actualité de la conquête de Mars. Il ne semble pas improbable qu'une collaboration entre l'entreprise privée Space X et les agences internationales soit mise en place en vue de cet objectif, comme cela est déjà le cas sur l'ISS.

« Becoming a multiplanetary species », telle est l'ambition du PDG de Tesla et Space X pour l'humanité, le sud-africain Elon Musk.

La colonisation de Mars serait ainsi la solution pour éviter notre extinction probable. Mais alors, comment envisager l'évolution des jeunes explorations inhabitées actuellement réalisées sur la planète rouge, à une ville martienne autosuffisante peuplée d'humains ?

Une civilisation autonome sur Mars compterait selon Musk environ un million d'être humains. Prévoyant d'envoyer 100 personnes par vaisseau spatial à chaque fenêtre de lancement (tous les deux ans), il faudrait compter 10 000 voyages et 100 ans pour parvenir à ce nombre (ou environ 50 « rendez-vous » avec Mars), le premier voyage étant prévu dans le calendrier de Space X pour 2024.

Selon Space X, quatre principes nécessaires et indispensables concourraient à la réussite de cette ambition :

- Complète réutilisabilité des ressources à disposition :

« The critical breakthrough to make life multiplanetary is for space travel to be like air travel » ; si les voitures ne pouvaient être utilisées que pour un trajet, très peu d'individus pourraient se permettre d'en avoir une. Musk étend ce principe aux voyages interplanétaires en ramenant un déménagement

⁹ Drake et Watts, « Human exploration of Mars design reference architecture 5.0 ».

sur Mars à un prix équivalent au prix moyen d'une maison aux États-Unis, soit environ 200 000 \$, grâce à la réutilisabilité des vaisseaux et des ressources.

Space X a déjà concrétisé cette ambition sur Terre, en construisant le premier lanceur (*Falcon 9*) réutilisable, capable de revenir vers sa base de lancement et d'y atterrir après s'être séparé du vaisseau qu'il a envoyé dans l'espace. Ce lanceur est actuellement utilisé pour réapprovisionner l'ISS. Le dernier lancement (et le premier habité pour *Falcon 9*) date du 30 mai 2020 et a permis de transporter deux astronautes de la NASA (Bob Behnken et Doug Hurley) jusqu'à l'ISS, actualisant la place des États-Unis dans la conquête spatiale et palliant leur dépendance aux navettes *Soyouz* russes qui étaient les seuls transporteurs spatiaux disponibles depuis 2011.

- Réapprovisionnement en orbite :

Ce processus permettrait de diminuer la taille des vaisseaux (qui ne nécessiteront pas plusieurs étages pour atterrir sur la planète), ainsi que la durée du réassort.

- Production de carburant sur Mars :

Une quantité nécessaire de carburant est absolument essentielle afin d'assurer un retour des vaisseaux sur Terre, afin d'acheminer ressources et personnes.

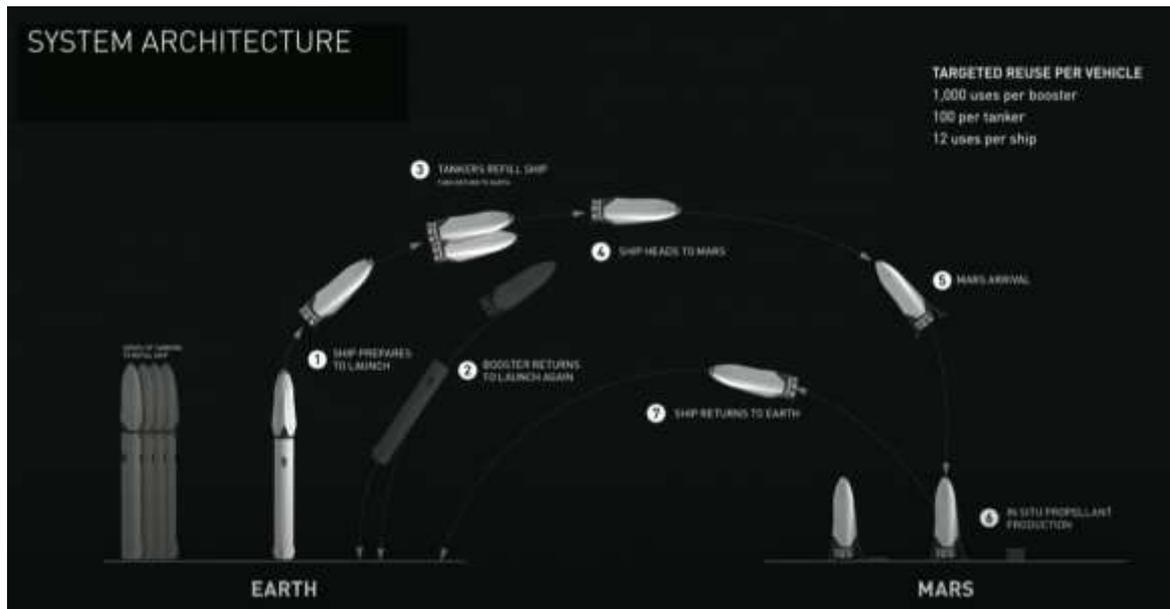
Produire de l'énergie sur Mars permettrait de ne pas avoir à embarquer une quantité supplémentaire de carburant lors du voyage aller, et ainsi d'économiser espace et argent.

- Choix d'un type de carburant adéquat :

Mars possède en surface du CO₂ et de l'eau, avec lesquels on peut produire un carburant à base de méthane et d'oxygène densifiés CH₄/O₂.¹⁰

¹⁰ Musk, *Making Humans a Multiplanetary Species*.

Figure 5 : Schéma explicatif du modèle de transfert entre la Terre et Mars selon Space X.



Source : Musk, « Making humans a multiplanetary species », 2016.

La démarche visant à l'économie et la réutilisabilité des ressources et de l'espace fait écho à celle déjà mis en œuvre lors des missions d'exploration habitées des agences spatiales internationales, et plus globalement à celle de l'aérospatial en général : le manque de place, le coût d'envoi de matériel dans l'espace (20 000 \$ par kilogramme), la quantité limitée de ressources ainsi que la durée d'autosuffisance nécessaire implique l'adoption d'une gestion durable, responsable et éclairée des ressources embarquées. C'est également un des enjeux de la prise en charge dentaire des spationautes.

Rendre la planète viable passerait en premier lieu par une augmentation de sa température de surface : ce processus de réchauffement appelé *Terraforming* consisterait en l'émission voulue de gaz à effet de serre à la surface de Mars. On estime à 100 ans la durée nécessaire pour réchauffer la planète par ce biais. Le gaz à effet de serre choisi pour le réchauffement serait un composé perfluoré (PFCs) sans nocivité pour la couche d'ozone, non-toxique et constitué d'éléments tels que le carbone, le soufre et le fluor, déjà présents sur Mars. Le réchauffement entrainerait la libération des éléments emprisonnés dans les calottes glaciaires pour former une atmosphère épaisse.

Le *Terraforming* permettrait la mise en place de tous les éléments nécessaires à la vie humaine sur la planète : une atmosphère dense grâce à la libération de CO₂, ainsi que la fonte des glaces fournissant assez d'H₂O pour créer nuages dans le ciel et cours d'eau à la surface.

En amont, il est essentiel de connaître les quantités totales disponibles de ces éléments sur Mars. Actuellement, il est difficile de réaliser ces estimations du fait de la surface limitée explorée de la

planète et de l'emprisonnement des molécules dans certaines zones reculées. Des traces de fluor ont également été retrouvées par *Curiosity* dans des rochers (élément essentiel pour la création de gaz à effet de serre).

Ce processus, bien que très sérieusement étudié, soulève de nombreuses interrogations éthiques et scientifiques de par son caractère irréversible. Ainsi, avant sa mise en œuvre, plusieurs éléments devront être assurés : les quantités totales d'H₂O, CO₂ et nitrate présentes, la présence de la vie (passée ou actuelle) et son lien avec la vie sur Terre et le caractère éthique de la démarche visant à rendre Mars habitable.

Si aucune trace de vie n'est trouvée sur la planète rouge, alors la situation sera plutôt simple, mais ce schéma est difficilement atteignable : il sera en effet difficile de statuer sur l'absence complète de vie sur Mars, et ce même après des recherches approfondies. Si un type de vie est trouvé sur Mars, sa relation avec celle de la Terre doit être déterminée : si elles sont reliées (possiblement suite à des échanges via météorites) alors la situation est familière et on se posera la question de quand et comment réintroduire la vie sur Mars. Par contre, si elle ne présente aucun lien avec celle sur Terre, alors d'importantes questions techniques et éthiques seront soulevées.¹¹

Enfin, la contamination croisée des planètes est une préoccupation majeure : répandre des micro-organismes terrestre à la surface de Mars compliquerait inévitablement la recherche de forme de vie martienne (les robots actuellement envoyés sont désinfectés mais pas stérilisés, car on considère que les germes ne peuvent survivre aux conditions actuelles de la planète, bien que ceci ait été contesté par des recherches récentes qui ont montré que certains le pouvaient). Étant donné le nombre d'échec de missions sur le total des quarante lancées vers Mars, la probabilité d'un crash de module lors de son arrivée fait planer le risque d'une dissémination de milliards de germes sur l'astre rouge.

L'urgence d'Elon Musk à vouloir installer une colonie sur Mars dans l'éventualité d'une extinction prochaine de la race humaine (suite à la collision d'un astéroïde avec la Terre, une éruption volcanique ou une guerre nucléaire par exemple) n'a pas de justification imminente, et la communauté scientifique reste réservée quant à ces arguments. Cela s'applique au très controversé projet de l'ONG « Mars One », qui prévoit également d'envoyer des hommes sur Mars à l'horizon 2025, sans retour sur Terre.¹²

Jacques Arnould, président du CNES, avançait ainsi en 2015 :

¹¹ McKay, « Is it possible to create a viable atmosphere on Mars? »

¹² thomasj83, « Pourquoi Elon Musk ne doit pas envoyer l'Homme sur Mars ».

« Commençons d’abord par faire encore de la bonne science, de la bonne exploration. Et quand nous connaissons bien la planète Mars, par des robots, et peut-être un jour par des explorateurs humains qui reviendront sur Terre, on pourra penser à la colonisation ». ¹³

La colonisation de Mars s’inscrira probablement dans le futur de l’humanité – compte-tenu du nombre de projets allant dans ce sens – et cela sous-entendra un transfert sur place de l’ensemble des technologies et compétences terrestres afin de créer *de novo* une autonomie dans tous les aspects de la vie ; la prise en charge dentaire sur la planète rouge consistera alors en une réadaptation des protocoles terrestres, permise par la présence de chirurgiens-dentistes « martiens ».

Ainsi, la suite de cette thèse sera exclusivement développée dans le cadre des missions interplanétaires avec retour sur Terre, représentant un véritable enjeu logistique, organisationnel et technologique ayant pour but de préserver et maintenir la santé des spationautes durant plusieurs années.

1.2 Caractéristiques et contraintes d’une mission interplanétaire

1.2.1 Durée

Tandis que la recommandation pour un adulte à risques parodontal et carieux faibles est d’effectuer une visite de contrôle annuelle chez un chirurgien-dentiste, une mission interplanétaire vers Mars durera donc environ deux ans et demi. En cas d’urgence, un retour sur Terre sera impossible.

Il est considéré qu’entre 35 et 55 ans (tranche d’âge majoritaire des spationautes), les principaux objectifs d’un suivi bucco-dentaire sont : l’interception d’éventuelles maladies parodontales, la réalisation d’un bilan carieux et la prévention des cancers buccaux (anamnèse détaillée, éventuel test salivaire, sondage parodontal). ¹⁴

En 1978, lors d’une mission sur la station spatiale *Saliout* où il a séjourné durant 96 jours, le cosmonaute soviétique Iouri Romanenko a souffert de douleurs dentaires sévères durant les deux dernières semaines de la mission, mettant en péril son travail. La survenue d’un tel événement lors d’un voyage de deux ans et demi, au sein d’un équipage réduit où chaque membre a un rôle

¹³ Gavois, « Coloniser Mars : l’ambitieux projet de SpaceX en 15 questions ».

¹⁴ Union française pour la santé bucco-dentaire, « L’UFSBD réactualise ses stratégies de prévention ».

indispensable, risquerait de compromettre la mission et représenterait un danger pour l'ensemble de l'équipe.

La prise en charge bucco-dentaire actuelle des spationautes est axée sur une prévention accrue en amont des vols pour prévenir la survenue d'incidents qui pourraient entraver le bon déroulement de la mission, la formation de certains membres d'équipage (appelés *Crew Medical Officer* ou CMO) et un kit de soins dentaires rudimentaire (qui n'a pas été inclus dans les missions *Apollo*, considérées de trop courte durée pour justifier cet ajout de poids supplémentaire). En accord avec les modalités de prise en charge dentaire pré-vol appliquées par les agences spatiales internationales, il a été établi que la probabilité de survenue d'une urgence dentaire incapacitante était d'1/9000 jour-homme.¹⁵

Ces protocoles sont en adéquation avec les missions de courtes durées (quelques jours à quelques mois) réalisées en orbite terrestre (ou même sur la Lune) avec possibilité de retour sur Terre en cas d'urgence ou de douleur incapacitante. La faible probabilité de survenue d'un incident est à mettre en perspective avec les conditions inédites auxquelles seront soumises les spationautes lors de missions vers Mars.

1.2.2 Alimentation

Loin de la représentation populaire selon laquelle le régime des spationautes serait exclusivement composé de paquets lyophilisés, l'alimentation dans l'espace a beaucoup évolué depuis le premier repas consommé par Yuri Gagarin dans l'espace en 1961. Cet évènement fut la première démonstration de la capacité du corps humain à digérer de la nourriture en microgravité.

Figure 6 : Cosmonautes de la mission Apollo-Soyouz Test Project ayant collées des étiquettes de vodka sur des tubes de soupe pour trinquer avec leurs collègues américains.



Source : Agence spatiale européenne, « Astronaut nutrition in space », 2014.

¹⁵ Hawkins, Zieglschmid, et Lyndon, « Crew health and medical monitoring ».

Durant la période pré-vol, les spationautes sont invités à réaliser des sessions de « test » afin d'attribuer des notes à différents plats et ainsi permettre de planifier leurs menus en fonction de leurs préférences.

Même si les tubes et cubes de nourriture ont cédé la place aux conserves et que la diversité alimentaire se soit améliorée avec le temps, le choix de nourriture sur les vols spatiaux reste limité. Aujourd'hui, la majorité des aliments consommés sont réhydratés et/ou réchauffés en vol, pour améliorer leur goût et éliminer tout micro-organisme potentiellement dangereux. De temps en temps, l'équipage consomme des pommes fraîches, des noix et des fruits secs (les fruits et légumes frais doivent cependant être consommés dans les premiers jours).

Une alimentation « optimale » (associée à un exercice physique constant) est absolument essentielle pour contrer les effets de la microgravité imposée par les vols spatiaux sur le corps humain, ainsi qu'au maintien du moral de l'équipage. Ainsi, des aliments « bonus » (mais cariogènes) sont épisodiquement envoyés sur l'ISS, afin de compenser le stress et préserver le moral de l'équipage.

Figure 7 : Caisse d'aliments "bonus".



Source : Agence spatiale européenne, « Astronaut nutrition in space », 2014.

Quels sont les impacts de l'environnement spatial sur l'alimentation ?

- Heure de repas : le bol alimentaire prend plus de temps à traverser le système digestif, et donc à être digéré ; de ce fait, les spationautes sont encouragés à réduire le volume de leurs repas au profit d'encas répartis tout au long de la journée (ajouté au grignotage pour pallier le stress).

- Appétit diminué : une des raisons avancées pour expliquer ce phénomène serait l'absence de tassement de la nourriture au niveau de la partie basse de l'estomac.
- Goût : les spationautes rapportent que les goûts dans l'espace sont modifiés, et qu'ils préfèrent la nourriture plus épicée ; cela serait dû à un mouvement des fluides qui congestionnerait le nez, impactant le sens de l'odorat. Cette diminution des sensations de goûts pousse les astronautes à utiliser plus d'exhausteurs de goûts et de condiments (comme le ketchup, très sucré), potentiellement délétères pour leur santé bucco-dentaire.
- Diminution de l'activité gastro-intestinale : résultant de la diminution de quantité de liquide ingérée ajoutée à l'altération du mouvement des fluides ; de plus, avec des organes en constante suspension, l'absorption des nutriments n'est pas aussi optimale que sur Terre.
- Expansion du foie et du pancréas.

« L'alimentation dans l'espace a un goût différent – c'est comme se nourrir avec un rhume et un appétit réduit » disait Thomas Pesquet, astronaute français de l'Agence Spatiale Européenne.

Pour assurer un apport nutritionnel équilibré et suffisant, l'alimentation des spationautes est planifiée en amont, puis monitorée en vol grâce à des outils tels que « EvryWear » (utilisée par l'ESA), fonctionnant sur le même principe que les applications de « food-tracking » largement popularisées sur Terre. Une attention particulière est portée à l'absorption de doses suffisantes de calories globales, protéines, eau, glucides, lipides, sodium, calcium, fer et potassium. Une équipe d'experts en nutrition au sol suit leur alimentation en temps réel, et peut leur communiquer des recommandations ou réajustements à opérer le cas échéant.¹⁶

Une même quantité d'énergie est nécessaire dans l'espace et sur Terre. Ainsi, les besoins des spationautes sont calculés selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé : un homme d'environ 80 kg nécessitera environ 3000 kcal par jour, tandis qu'une femme de 60 kg d'environ 2100 calories.

Un équipage complet sur l'ISS consomme environ 1400 kg de nourriture, 1300 litres d'eau et 150 litres de gaz par semestre. Pour permettre de longues explorations habitées vers la Lune ou Mars, l'ESA a développé un système régénérant appelé « MELISSA » (Micro-Ecological Life Support System Alternative) qui transformerait les déchets des astronautes en approvisionnement frais (exclusivement végétarien). Certaines algues comme la spiruline, capable de transformer le dioxyde de carbone en

¹⁶ European space agency, « Diet tracker in space ».

très précieux oxygène, se multiplie rapidement et pourrait également être transformée en repas protéiné pour les spationautes.

En l'absence de réalimentation des vaisseaux, nourrir les astronautes durant de longues missions sera un véritable défi. Parmi les nombreux enjeux que comportent la création d'un système alimentaire pour les futures explorations interplanétaires, on compte la conservation des aliments (péremption de sécurité de 3 à 5 ans), leur taille, et l'utilisation minimale d'emballage. La production d'aliments frais dans l'espace, et donc de se rapprocher au mieux d'une alimentation terrestre équilibrée, est l'objectif ultime : la première expérimentation de ce procédé est le projet « *Veggie* » sur l'ISS, qui permet de faire pousser quelques légumes.¹⁷

1.2.3 Rayonnement cosmique

L'espace n'est pas vide : des particules de haute énergie y gravitent sans cesse. Dans notre système, elles proviennent du Soleil et sont appelées particules d'énergie solaire. Majoritairement composées de protons (et dans une moindre mesure d'électrons), elles sont si rapides qu'elles peuvent atteindre notre planète, située à 150 millions de kilomètres, en moins d'une heure. Sur Terre la magnétosphère, via les anneaux de Van Allen, nous protège de ces radiations en déviant quasiment toutes ces particules, le reste étant capturé par l'atmosphère. La Station Spatiale Internationale étant située en orbite basse, elle est par exemple toujours protégée par la magnétosphère terrestre, et la structure de la station participe également à protéger l'équipage.

Ces rayonnements sont à même de traverser la peau, et ainsi causer de multiples dommages sur l'ADN et les cellules, ce qui augmente considérablement le risque de cancers dans le cadre de missions de longue durée.¹⁸ À court terme, ces radiations peuvent avoir des conséquences sur le cerveau, le cœur et le système nerveux central, entraînant notamment des pathologies dégénératives. Une prévalence élevée de cataractes a également été détectée chez les astronautes.

« La dose de radiation d'un jour dans l'espace équivaut à celle d'un an sur Terre » avançait le physicien Marco Durante.

La *Nasa Twin's study*, réalisée en 2015-16 entre deux jumeaux (l'un des deux étant astronaute retraité), a permis de statuer sur l'imputabilité des mutations génétiques aux radiations subies dans l'espace.

¹⁷ European space agency, « Space food : astronaut nutrition ».

¹⁸ Tran, « How NASA will protect astronauts from space radiation at the Moon ».

Les récentes données de l'orbiteur *ExoMars* ont démontré qu'un séjour de 6 mois sur la planète rouge exposerait un astronaute à 60 % de la dose totale limite recommandée pour l'intégralité de sa carrière.

Afin de développer des protections efficaces pour les astronautes qui iront sur Mars, l'ESA s'est associée à cinq entreprises européennes pourvues d'accélérateurs de particules afin de recréer les radiations cosmiques permettant de bombarder cellules et matériaux. Fort de ces expériences, le lithium apparaît comme un matériau de choix pour la protection des radiations lors des futures missions interplanétaires.¹⁹

1.2.4 Communication avec la Terre

Outre l'isolement physique imposé par une expédition interplanétaire, la communication avec la Terre sera également délicate. Malgré les satellites déjà en orbite autour de Mars, le débit et la vitesse de transmission des informations entre les deux planètes sont grandement rallongés : l'envoi d'un enregistrement radio prendra en moyenne 13 minutes et 48 secondes (pouvant aller jusqu'à 24 minutes), et le même temps pour revenir à son expéditeur.²⁰

Le débit sera également grandement diminué : le signal radio d'un vaisseau perd de sa puissance très rapidement à mesure qu'il s'éloigne de la Terre, alors que le niveau du « bruit » (autres sources d'énergies pouvant obscurcir le signal) reste le même. Cela rend la compréhension des informations moins aisée pour les deux interlocuteurs. Ainsi, le débit d'envoi d'une information directe de Mars vers la Terre varie de 500 à 32 000 bits/seconde, soit moitié moins que le modem standard d'un particulier sur Terre.²¹

Dans ces conditions, une consultation conventionnelle de télé-médecine (telles qu'elles se déroulent sur l'ISS par exemple) ou l'envoi de fichiers volumineux comme des radiographies, photographies ou enregistrements vidéo semblent difficilement utilisables en routine pour le suivi médical, et notamment bucco-dentaire des spationautes.²²

¹⁹ European space agency, « The Radiation Showstopper for Mars Exploration ».

²⁰ Ormston, « Time delay between Mars and Earth ».

²¹ Qualitative reasoning group, « Why does the data transfer rate have to drop with distance ? »

²² National aeronautics and space administration, « Communications with Earth on NASA's Mars exploration program ».

1.3 Conséquences métaboliques de la microgravité

Lors du transfert entre la Terre et Mars, les spationautes seront soumis à l'impesanteur (ou apesanteur), absence de gravité lors du transit entre deux corps planétaires. Les effets de ce phénomène sur le corps humain sont multiples, mais leur prédiction exacte dans le cadre d'une mission vers Mars est difficilement estimable, du fait qu'ils aient été étudiés en condition de microgravité (persistance d'une faible gravité terrestre), car effectués sur l'iSS située en orbite terrestre basse. On note par exemple des conséquences sur le fonctionnement du système proprioceptif, mais qui ne sera pas développé ci-dessous.

1.3.1 Atteintes osseuses

On a constaté dans l'espace une perte de densité d'1 à 2 % par mois (dix fois supérieur à celle d'une femme en ménopause). En plus d'un risque de fracture augmenté, le relargage de minéraux par les os entraîne l'apparition de calcifications et calculs dans les tissus mous, notamment dans les glandes salivaires, source d'obstruction des canaux excréteurs et de diminution du débit salivaire.

En l'absence de sollicitation mécanique assurée par la gravité lors des mouvements, l'équilibre du remodelage osseux assuré d'une part par les ostéoblastes (inducteurs de tissu osseux) et d'autre part les ostéoclastes (résorbant le tissu osseux) est rompu en faveur d'une déminéralisation.

Sans contremesure, la densité osseuse des astronautes revenant d'une mission sur Mars serait environ 2,5 fois moins importante que celle recommandée pour une population de jeunes adultes. L'exercice physique et la supplémentation en vitamine D, K et en calcium sont utilisés pour y pallier.

Dans le cadre des missions de longue durée, d'autres mesures plus drastiques sont envisagées pour contrer le phénomène d'ostéoporose : prise de biphosphonates (qui compliquerait alors la prise en charge bucco-dentaire des spationautes notamment par l'introduction d'un risque infectieux), d'hormone parathyroïdienne, utilisation d'un plateau vibrant (à 30Hz), et la recréation artificielle de gravité.²³

Établie à l'un des endroits les plus hostiles de notre planète où l'absence totale de lumière peut s'étendre jusqu'à trois mois, la station Concordia prodigue à l'ASE un emplacement idéal pour préparer les futures missions habitées vers Mars : elle permet notamment la réalisation de tests concernant la

²³ Moore et MacDougall, « Journey to Mars : physiological effects and operational consequences of long-duration microgravity exposure ».

survie, le suivi médical et la recherche psychologique. Les scientifiques ont ainsi pu suivre les effets du manque de lumière sur les os, et ainsi déterminer la dose de vitamine D avec laquelle supplémenter les spationautes, et ainsi prévenir les effets de l'obscurité prolongée d'une mission vers Mars.²⁴

1.3.2 Atteintes musculaires

Parmi les études réalisées sur les spationautes en missions longues sur les stations spatiales, une fonte musculaire a systématiquement été mise en avant : le muscle du mollet par exemple perd en moyenne 13 % de son volume en six mois, et un changement de nature de fibres musculaires de 10 à 17 % entre le type I (prédominant dans les muscles posturaux) et le type II (fibres rapides) est observé.

Une des premières conséquences de cet affaiblissement musculaire est l'impossibilité pour le spationaute de réaliser un atterrissage d'urgence ou des sorties extravéhiculaires extrêmement éreintantes (pouvant durer jusqu'à neuf heures).

L'exercice physique et l'électrostimulation sont actuellement utilisés pour pallier cette perte musculaire. La supplémentation en acides aminés ainsi que la néo-crédation de gravité artificielle sont envisagées pour les missions de longue durée.²⁵

1.3.3 Atteintes cardiovasculaires

Sur Terre, la position debout au sein du champ gravitationnel crée un gradient hydrostatique : la pression artérielle varie, de la tête aux pieds, de 70 à 200 mmHg.

Entraîné par la gravité, le sang descend naturellement le long des jambes et remonte via les contractions des muscles squelettiques grâce au système veineux et à la présence de valves prévenant le retour sanguin.

En microgravité, la perte immédiate de ce gradient entraîne une remontée des fluides vers la tête (d'environ 1 à 2 litres). Cet afflux de liquide au cerveau est perçu par les capteurs de pression sensibles au volume céphalique comme un excès de fluide, ce qui provoque en réponse à cette hypervolémie présumée une diminution en volume des fluides du corps (17 % du volume plasmatique total dans les 24 premières heures de vol, puis une perte progressive de masse des globules rouges, causant une baisse du volume sanguin total de 10 %).

²⁴ European space agency, « Space food : astronaut nutrition ».

²⁵ Moore et MacDougall, « Journey to Mars : physiological effects and operational consequences of long-duration microgravity exposure ».

Sur Terre, cette variation serait assimilée à une importante hypovolémie : lors du retour de mission, ceci peut conduire à une intolérance (incapacité de maintenir un afflux sanguin au cerveau debout) à l'origine de possibles épisodes de tachycardie, chute de pression artérielle voire dans certains cas de vertige ou d'évanouissements.

Pour les vols de longue durée en microgravité, il est envisagé d'administrer aux spationautes de la midodrine, un vasopresseur anti-hypotenseur : on compte parmi ses effets secondaires potentiels des atteintes muqueuses, et donc possiblement des répercussions sur la sphère orale. La création artificielle de gravité dans l'enceinte de l'habitat du voyage pourrait également permettre de pallier ces conséquences.

1.4 Conséquences dentaires et risques

Il apparaît que le maintien de la santé orale des spationautes nécessite une réponse combinée à des facteurs extrinsèques imposés par le cadre d'une mission interplanétaire, et des facteurs intrinsèques causés par la modification de paramètres physiologiques due à la microgravité. Ainsi, on peut diviser le panel de risques dentaires potentiels en deux catégories : les risques d'origine infectieuse et ceux d'origine mécanique.

1.4.1 Risque infectieux

Les pathologies orales d'origine bactérienne peuvent se développer sur les tissus dentaire et péri-dentaire : il s'agit d'une part des lésions carieuses et endodontiques, et d'autre part des maladies parodontales.

Parmi les facteurs qui peuvent favoriser la survenue de lésions carieuses ou de maladies parodontales chez les spationautes, on trouve :

1.4.1.1 L'alimentation

Comme mentionné précédemment, le régime alimentaire des spationautes est pauvre en produits frais, riche en lipides et en glucides et souvent même enrichi en exhausteurs de goûts potentiellement très sucrés (cf. ketchup). Constituant le « carburant » des bactéries cariogènes, un apport plus important en sucres réparti tout au long de la journée favoriserait leur activité ainsi que le développement de biofilm puis de plaque.

1.4.1.2 Salive

En conditions normales, elle possède un pouvoir tampon physiologique (conféré par la présence d'un acide faible et de ses sels), lui permettant de contrôler les variations de pH causées par l'activité bactérienne et donc, dans une certaine mesure, de prévenir la déminéralisation dentaire.

Elle contient également différentes protéines ayant une affinité particulière pour certains tissus dentaires, et permettant de former la pellicule acquise exogène qui favorise la sélection de certaines bactéries en surface (les PRP à caractère acide ont par exemple une affinité particulière pour l'émail).²⁶

En microgravité, la salive subit des modifications qualitatives et quantitatives : la redistribution des fluides corporels dans le sens d'une diminution globale en volume des liquides conduit par extension à une diminution de la sécrétion salivaire.

Il a été mis en évidence lors d'une mission Skylab simulée que la quantité de fluide salivaire, d'immunoglobulines ainsi que le statut parodontal étaient modifiés, les effets augmentant avec la durée de la mission persistant jusqu'à plusieurs semaines après le retour sur Terre. Une étude menée en 2013 et recréant les conditions d'une mission sur Mars à la Mars Desert Research Station aux États-Unis, a permis de préciser ces effets : 12 hommes en bonne santé générale placés en isolement durant deux semaines se sont vus attribuer des tâches semblables en termes de complexité et de durée à celles incombées aux spationautes lors des missions spatiales. Trois prélèvements (avant la mission, à une puis à deux semaines) ont mis en évidence une diminution des immunoglobulines salivaires (IgA, IgM et IgG garantes de l'immunité muqueuse), une augmentation du cortisol et de l'alpha-amylase salivaire (marqueurs du stress), une augmentation de Streptocoque mutans (bactérie cariogène) et un statut parodontal globalement dégradé. La simulation ayant été conduite sur Terre et donc en l'absence d'apesanteur et de ses conséquences sur l'organisme, ces modifications seraient uniquement imputées au stress, auquel il faudra ajouter l'impact de la microgravité pour les spationautes en route vers Mars.²⁷

1.4.1.3 Stress

Il est décrit comme une réponse adaptative de l'organisme aux environnements hostiles : nos émotions sont produites par le système nerveux central, lui-même étroitement lié à notre système immunitaire. Ainsi, le stress influence l'immunité et vice-versa, ce qui n'est pas sans conséquence sur

²⁶ Pellat, « Salive, fluide gingival, fluide oral ».

²⁷ Rai et Kaur, « Periodontal status, salivary immunoglobulin, and microbial counts after short exposure to an isolated environment ».

la capacité de l'organisme à se défendre contre des agresseurs, comme les bactéries cariogènes et parodonto-pathogènes, et ainsi limiter le développement de maladies carieuses ou parodontales.

Lors des futures missions interplanétaires, les équipages internationaux auront à réaliser une quantité conséquente de tâches complexes sur des périodes de temps étendues, dans un environnement extrême et isolé : ceci sera à l'origine d'un stress important. Il a ainsi été reporté que la moitié des spationautes revenaient sur Terre avec un système immunitaire diminué.

L'étude « Immuno » menée par l'Agence Spatiale Européenne a monitoré durant cinq ans sur l'ISS, d'une part le stress ressenti par les spationautes, et d'autre part celui exprimé par certains marqueurs dans des échantillons de salive, d'urine et de sang. Alors que les astronautes furent très efficaces pour estimer leur niveau de stress en comparaison des quantités de marqueurs de stress retrouvés dans les échantillons prélevés, un phénomène surprenant a été mis en avant : une réponse immunitaire exacerbée à des microorganismes qui n'auraient causé qu'une réaction légère chez un sujet en bonne santé sur Terre. La cause de cet affolement immunitaire est inconnue, mais a mis en lumière la contradiction apparente entre l'adaptation du système immunitaire à un environnement dépourvu de germe dans l'espace, et le fait qu'il reste extrêmement alerte et sur-réagisse en cas d'infection : cela pourrait être dû au cadre unique et particulièrement stressant auquel sont soumis les spationautes.²⁸

1.4.1.4 Virulence bactérienne

L'affaiblissement de l'immunité et la diminution de la quantité de salive offrent logiquement un terrain favorable au développement des bactéries pathogènes. Mais il semble qu'additionné à ces conditions, l'activité de celles-ci soit modifiée en l'absence de pesanteur : une étude menée in vitro et simulant des conditions de microgravité a mis en évidence une augmentation de la résistance de *Streptococcus mutans* à un milieu acide, une modification de l'architecture du biofilm ainsi que la distribution des polysaccharides extracellulaires de *S. mutans*, lui permettant d'adhérer aux surfaces dentaires. Dans le biofilm à deux espèces utilisé dans l'expérience, une augmentation de la proportion de *S. mutans* a également été observée. Ces éléments représentent la virulence d'une bactérie : sa capacité à survivre en milieu acide, à adhérer aux surfaces dentaires et à produire des acides à l'origine de la déminéralisation dentaire. Cependant, il est important de noter que cette expérience a été réalisée in vitro, en présence d'uniquement deux espèces bactériennes, ce qui est assez éloigné de la réalité d'un biofilm qui en contient bien plus. Ainsi, il semble qu'en plus de conditions locales

²⁸ European space agency, « Stressed in Space ».

défavorables au maintien d'une santé bucco-dentaire optimale, les attaques acides par des bactéries pathogènes seraient plus agressives.²⁹

1.4.2 Facteur mécanique

1.4.2.1 Traumatismes

Malgré l'absence de pesanteur, les spationautes seront amenés à déplacer des objets (parfois lourds) et à se mouvoir dans un espace restreint, ce qui rend probable la survenue de collision au niveau de la face (et par extension d'atteintes dentaires).

La perte de densité osseuse observée dans l'espace concerne également (bien que dans une moindre mesure) l'os alvéolaire, ce qui n'est pas sans conséquence sur le risque de fracture osseuse, même dans le cas de chocs légers.

Si une fracture dentaire survient à la suite d'un traumatisme, la prise en charge par l'équipage en vol variera selon sa gravité :

- Fracture amélo-dentinaire avec ou sans exposition pulpaire : obturation simple de la plaie.
- Luxation et extrusion : pas de soin particulier si simple mobilité ; repositionnement dans une occlusion correcte si déplacement important. L'enjeu majeur sera la qualité de l'examen clinique, afin d'identifier la ou les dent(s) atteintes, et déceler d'éventuelles fractures alvéolaires associées.
- Expulsion : seule véritable urgence car la dent expulsée peut aller se loger, en l'absence de gravité, au niveau de l'oropharynx.³⁰

1.4.2.2 Variations de pression

En vol ou sur Mars, les spationautes seront exposés à des pressions drastiquement variables : si la pression atmosphérique terrestre est d'environ 130 kPa (au niveau de la mer), elle est en revanche de 6,4 kPa sur Mars. Malgré des combinaisons spatiales pressurisées atténuant cet écart, une variation de pression sera inévitable lors des sorties extravéhiculaires.³¹

Ces variations peuvent être à l'origine de complications : on parle de **barotraumatisme** en cas d'inadaptation du corps à des changements de pression subites, et de **barodontalgie** si des douleurs en découlent (d'origine sinusienne, elles se projettent au niveau des dents).

²⁹ Cheng et al., « Effects of simulated microgravity on Streptococcus mutans physiology and biofilm structure ».

³⁰ Barratt, Baker, et Pool, *Principles of clinical medicine for space flight*.

³¹ Lakshmi et Sakthi, « Aviation dentistry ».

Alors que les barotraumatismes résultent d'une différence de pression entre les gaz à l'intérieur du corps et celle du fluide environnant trop importante pour que le corps s'y adapte, les barodontalgies ne sont en réalité qu'un symptôme révélateur d'une pathologie dentaire déjà existante, et dont la variation de pression n'est qu'un déclencheur (elles peuvent révéler une simple lésion carieuse, mais également une pulpite, ou une poche parodontale...).

On différencie les barodontalgies directement liées à l'état pulpaire, et les barodontalgies « indirectes » induites par une barosinusite (ou barotidite).

De nombreux cas de douleurs plus ou moins diffuses ont été rapportées par les professionnels de l'aviation (civile ou militaire), bien qu'elles restent souvent inexplorées en raison du peu d'attention que ceux-ci leur portent. Pourtant, ces douleurs peuvent s'avérer incapacitantes, et donc compromettre la réussite de la mission.

En ce qui concerne les prothèses fixées (couronnes, onlay, inlay, bridges), leur longévité est aussi intimement liée aux changements de pression, qui surviennent notamment dans les microtubules de la couche cémentaire. Ces fluctuations entraînent une diminution de la rétention de la couronne, et il a ainsi été mis en évidence lors d'une étude expérimentale sur dents couronnées extraites que la rétention des couronnes périphériques diminuait à mesure qu'on y appliquait des cycles de pressions différentes (il est à noter que ce phénomène est observé pour les prothèses scellées, et qu'aucune différence n'a cependant été observée pour les couronnes collées).

Figure 8 : Schéma de l'adaptation d'une couronne périphérique au niveau d'une deuxième prémolaire mandibulaire



Source : Dr Lamboley, « Ciment medident rescellément+ », 2020.

Chez les spationautes, c'est lors des phénomènes de décollage que des pertes de couronnes/restaurations ont été rapportées, la variation de pression causée par le gain d'altitude rapide s'additionnant aux vibrations du vaisseau.³²

N.B : la rétention des prothèses amovibles est également dépendante de la pression atmosphérique, de l'adhésion aux tissus et de la gravité. Cependant, aucun spationaute n'en est à ce jour porteur, ce pourquoi nous avons décidé de ne pas développer ce sujet.

³² Hord, Simmons, et Mclaughlin, « Mariner 9 ultraviolet spectrometer experiment (pressure-altitude measurements on Mars) ».

2 : Technologies numériques et dentisterie moderne

2.1 Chaîne CFAO : principe, applications et interopérabilité

Initialement développée pour le secteur automobile, la CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur) a trouvé ses premières applications en dentisterie il y a une trentaine d'années. C'est notamment les travaux de François Duret, qui en 1987 dans sa thèse sur l'empreinte optique a permis de faire connaître le numérique et de le promouvoir en tant que valeur ajoutée à notre pratique.

Il a connu un essor particulier ces dix dernières années, pour finalement intervenir dans tous les maillons et spécialités de notre profession, bien qu'une minorité de dentistes en soient équipés aujourd'hui, surtout en raison de son coût élevé.

En prothèse dentaire, une chaîne de CFAO désigne « un ensemble de moyens technologiques coordonnés qui permettent l'enregistrement (Acquisition) sous forme numérique des données cliniques analogiques et la modélisation virtuelle (CAO), puis la réalisation matérielle (FAO) d'un dispositif médical sur-mesure ». ³³

Quatre étapes se succèdent dans le déroulement de cette chaîne, et plusieurs équipements interviennent : une caméra intra-orale (numérisation/acquisition), un ordinateur équipé d'un logiciel spécialisé (CAO) et une unité d'usinage ou imprimante 3D (FAO + MOCN).

2.1.1 Numérisation

Utilisant divers procédés (laser, senseurs mécaniques...) l'objectif de la numérisation 3D par balayage est de mesurer les contours de la surface de l'élément scanné afin d'en générer un fichier ensuite maniable par un logiciel dédié.

Déjà à ce stade, les applications sont variées (numérisation des empreintes, des fabrications, des modèles, des maquettes), mais nous nous intéresserons ici uniquement à son utilisation intra-buccale : elle permet de s'affranchir de l'étape de moulage d'empreinte, chronophage et encombrante, et est donc tout à fait adaptée aux contingences spatiales ³⁴

³³ Klouz, « La CFAO dentaire ».

³⁴ Centre national d'innovation et de formation des prothésistes dentaires, « Guide de la CFAO dentaire : numérisation 3D ».

Les industriels dentaires commercialisent de nombreux modèles de caméras intra-orales, et l'accroissement de la concurrence a favorisé le déploiement de moyens conséquents pour créer des caméras toujours plus performantes et compactes (leur poids varie aujourd'hui de 100 à 400 g).³⁵

Figure 9 : Exemple de sept caméras commercialisées par les principaux acteurs du secteur

							
Modèle	Cerec Omnicam	Trios 3 color	CS 3600	Emerald	Condor Scan	DWIO	iTero element
Marque	Dentsply Sirona	3Shape	Carestream	Plasmeca	Biotech	Dental Wings	Align Technology

Source : Cantayre et Nasr, « Sept caméras d'empreintes optiques intra-orales au banc d'essai », 2018.

2.1.2 Conception assistée par ordinateur

Les logiciels de CAO dentaire utilisent majoritairement une modélisation géométrique polygonale (via triangulation d'un maillage de points) pour restituer la forme de l'élément scanné sous forme d'un fichier STL au sein d'un logiciel exploitable.

Initialement imaginé par les industriels comme un système (et donc une offre commerciale) fermé, avec des fichiers seulement utilisables par un unique maillon créé par eux-mêmes, des fichiers « ouverts » ont fait leur apparition en 2006, rendant les empreintes optiques interopérables.

Particulièrement intéressant pour les missions spatiales, une caméra intra-orale embarquée fournira un fichier STL pouvant être traité par n'importe quel logiciel de CAO, permettant un choix de caméra motivé par les seules contingences de la mission (taille/poids/efficacité), et non une partialité imposée par le choix d'une marque pour l'ensemble de la chaîne.

³⁵ Cantayre et Nasr, « Sept caméras d'empreintes optiques intra-orales au banc d'essai ».

Figure 10 : CAO d'une couronne périphérique sur logiciel "Cerec"



Source : Cantayre et Nasr, « Sept caméras d’empreintes optiques intra-orales au banc d’essai », 2018.

Le champ d’application des logiciels de conception assistée par ordinateur s’est élargi au point d’être capable aujourd’hui de modéliser tous types de travaux prothétiques et orthodontiques, des prothèses amovibles à toutes sortes de restaurations partielles ou périphériques, ou encore des reconstitutions implanto-portées de grande étendue.

En vol, son utilisation ne sera évidemment pas orientée vers la réalisation de projets expérimentaux, d’envergure ou de pointe, mais surtout destinée au remplacement de restaurations prothétiques iatrogènes, perdues ou endommagées.³⁶

2.1.3 Fabrication assistée par ordinateur

Cette étape fait le lien entre les composantes virtuelles et matérielles de la chaîne CFAO : à partir du fichier issu de la CAO, des séquences de mise en forme sont mises au point puis transmises à une MOCN (Machine-Outil à Commande Numérique) sous forme d’un fichier ISO (« *langage de programmation normalisé supporté par la plupart des machines* »).

On retrouve deux principales techniques de fabrication dans le domaine dentaire : l’usinage (un bloc de matériau est taillé selon la forme choisie) et la fabrication additive (des couches d’un matériau calcinable est successivement déposées par une imprimante 3D). Ces deux procédés sous-entendent des postulats de départ différents : bien que l’usinage soit le processus majoritairement utilisé en dentisterie, il suppose la présence de blocs de matériaux standards dont le volume sera diminué lorsqu’ils seront transformés en leur produit de destinée.³⁷

³⁶ Centre national d’innovation et de formation des prothésistes dentaires, « Guide de la CFAO dentaire : CAO ».

³⁷ Centre national d’innovation et de formation des prothésistes dentaires, « Guide de la CFAO dentaire : fabrication ».

Ainsi, il est probable que la technique additive soit retenue pour les missions spatiales de longue durée : en effet, le vaisseau sera déjà équipé d'une imprimante 3D chargée d'un matériau réserve utilisant la même technique. Elle a l'avantage d'éviter une perte de matériau lors du processus d'usinage, et ainsi ne pas avoir à stocker plus de matériau que ce qui sera utilisé, ce qui résulterait en une perte d'espace et un ajout de poids inutile.

Initialement mise en œuvre uniquement pour des fabrications en résine photo-polymérisable, l'addition fonctionne aujourd'hui avec tous les types de matériaux (résine, métal et céramique), ce qui rend d'autant plus probable son utilisation en vol.

La seule réserve quant à l'utilisation de ce processus de fabrication est le fait que chaque industriel utilise une technique de mise en forme qui leur est propre, ce qui rompt l'interopérabilité de l'ensemble de la chaîne, et pourrait être une contrainte de poids pour la mise en place de ce système lors des missions interplanétaires. Cependant, il est à noter que des projets de standardisation sont en cours dans le but de créer un standard de norme ISO STEP-NC (complétant la norme STEP – Standards for the Exchange of Product data – déjà en vigueur) et ainsi garantir une même qualité de CFAO tout en permettant une interopérabilité totale entre les constructeurs, quelque soit la méthode de fabrication utilisée.³⁸

2.2 Outils de diagnostics numériques

2.2.1 Fluorescence et trans-illumination

Conventionnellement, le leitmotiv de la démarche diagnostique dentaire consiste en un examen clinique d'une part et complémentaire d'autre part. Ces deux composantes ne sont néanmoins pas passées au travers de la numérisation massive qui a révolutionné notre pratique.

En ce qui concerne l'examen clinique, si aucune technologie n'a cherché à remplacer les compétences d'expertise du chirurgien-dentiste, des outils d'aides diagnostiques ont été créés : c'est le cas des technologies de trans-illumination et de fluorescence, utiles pour déceler des lésions carieuses au stade précoce ou dans des zones difficilement observables (zones inter-proximales par exemple), ou encore des fêlures de l'émail. Alors que ces méthodes ont été développées avec comme objectif initial l'optimisation du diagnostic pour le praticien, ils pourraient en constituer le fer-de-lance pour les

³⁸ Centre national d'innovation et de formation des prothésistes dentaires, « Guide de la CFAO dentaire : CFAO et standards numériques ».

spationautes, moins enclins à déceler ces lésions, pour confirmer un diagnostic basé sur un examen visuel.

Un avantage non-négligeable de ces méthodes est qu'elles peuvent être directement montées sur une caméra intra-orale, donc sans avoir besoin d'embarquer en vol un autre appareil complet.

Figure 11 : Deux sondes du système de trans-illumination I.C. Lercher



Source : Bertzbach, Zeisler et Bertzbach, « Diagnostic des caries et visualisation de composite à l'aide d'un système », 2018.

Afin de rendre leurs produits toujours plus attractifs, les industriels ont dotés ces technologies de multiples compétences : sondes à lumière UV pour la détection de caries, et à lumière blanche pour éclairer une surface en particulier.³⁹

On peut imaginer que ces outils puissent être utilisés en routine pour le dépistage de caries/lésions muqueuses en routine par les spationautes.

2.2.2 Radiographie

Les systèmes de radiographie dentaires furent parmi les premiers à bénéficier de la numérisation de notre profession : en plus d'une réduction de la dose de rayonnement jusqu'à 75% en comparaison des systèmes analogiques utilisés précédemment, cela a permis un transfert de l'image créée sur écran

³⁹ Bertzbach, Manfred, et Bertzbach, « Systèmes de diagnostic ».

et donc une possibilité d'en modifier les réglages (contraste, luminosité, netteté, cadrage), afin d'en optimiser l'analyse.⁴⁰

La qualité d'une image radiographique évoluant proportionnellement avec la compétence de l'opérateur, la possibilité de retoucher une image capturée par un membre de l'équipage par un expert sur Terre autoriserait une plus grande flexibilité en ce qui concerne les critères d'exigence de réalisation du cliché.

Peu importe le type de cliché, le principal inconvénient des systèmes de radiologie est leur taille : une capture intra-orale à l'aide d'un capteur (bite-wings, rétro-alvéolaires) nécessitera un tube radiographique et un unit de réglage de puissance ; l'orthopantomographie et le CBCT sont réalisés à partir un appareil radiologique imposant qui ne peut construire une image radio qu'en tournant autour du patient. Il est évident que cette caractéristique rend impossible l'embarquement de tels appareils à bord du vaisseau qui transportera l'équipage vers Mars.

Figure 12 : Système de radiographie panoramique/CBCT scanner (gauche), et générateur pour radiographie dentaire (droite)



Source : Medicaexpo. « Système de radiographie panoramique/scanner CBCT dentaire/système céphalométrique/numérique » et « générateur pour radiographie dentaire/numérique/à support mural », 2020.

Aucun système de radiologie dentaire n'a jusqu'ici été embarqué en vol lors de missions spatiales du fait de leur durée restreinte et de la proximité avec la Terre : seules les radiographies panoramique et intrabuccales effectuées avant le vol étaient consultables dans le vaisseau. Pourtant au-delà de six mois ces clichés seront désuets, et cette problématique sera un des défis majeurs que les agences

⁴⁰ Adent, « La radiographie dentaire ».

spatiales auront à résoudre pour que les spationautes assurent le maintien de leur santé bucco-dentaire et le succès de la mission.

2.2.3 Photographie

Au même titre que la radiographie, la photographie a évolué au cours des dernières décennies : la qualité, le stockage et la maniabilité des images s'en sont vus considérablement augmentés, ce qui en démocratisa son utilisation. Outre l'intérêt médico-légal que constitue une image, son utilisation s'est élargie jusqu'à être présente à toutes les étapes d'un traitement (diagnostic, communication avec le patient, le laboratoire ou un confrère, suivi, publications scientifiques...).

Cependant, malgré les avantages que présentent l'utilisation systématique de la photographie en dentisterie, un nombre assez important de dentistes est encore réticent à s'en équiper, son utilisation jugée trop complexe (poids, ergonomie, maniabilité, réglages...).

La plupart des clichés sont réalisés par des appareils photos réflex numérique avec flash intégré et flash macros (fixés sur l'appareil) annulaires ou bilatéraux.

Néanmoins, l'amélioration considérable de la qualité des appareils photos sur smartphones a favorisé une utilisation massive de ceux-ci par les chirurgien-dentistes. En 2013, une étude réalisée en République Dominicaine a mis en lumière la capacité des smartphones à capturer des images exploitables en dentisterie : 158 clichés intra-oraux pris par des étudiants ont été analysés par une équipe formée par un chirurgien oral, un omnipraticien et un parodontiste. Seuls 9 clichés furent jugés inutilisables.⁴¹

Il est important de mentionner que cette expérience fut réalisée avec des iPhones 4 et 4S ; alors que les appareils photos réflex sont pourvus de capteur de minimum 6 megapixels, Apple a sorti l'année dernière la version 11 de son iPhone, doté d'un appareil photo de 3 capteurs de 12 megapixels (au même titre que ses concurrents Samsung, Huawei et Google la même année : le marché s'est diversifié et s'est uniformisé vers une qualité de photographie quasi-professionnelle). À ceci s'ajoutent des fonctionnalités d'autofocus, autostabilisation lors des prises vidéos, mode nuit, éclairage « studio » qui tendent à estomper la fine séparation qui subsiste entre appareils photos réflexes et smartphones. Enfin, des accessoires fonctionnant sur le même principe que les flashes macros montés sur appareils photos existent pour smartphone, ce qui serait ergonomiquement plus intéressant à embarquer en vol comme assistance photographique, plutôt qu'un appareil lourd et encombrant.

⁴¹ Bibas, « Utilisation du smartphone en photographie dentaire ».

Figure 13 : Exemple de système d'assistance photographique "studio" pour un smartphone



Source : Smile Line, « Smile Lite MDP mobile dental photography », 2020.

Il est à noter que la réalisation d'un cliché intra-oral correct nécessite l'utilisation d'écarteur(s) et de miroirs intra-oraux afin de permettre une visualisation correcte de la zone photographiée, qui devront être ajoutés au kit dentaire en vol pour permettre la réalisation de photographies dentaires.

Si l'optimisation des systèmes sur smartphone illustre la possibilité de réduire le volume des appareils en garantissant une qualité suffisante, toutes les missions spatiales embarquent aujourd'hui des appareils photos réflexes extrêmement performants (la NASA est par exemple en partenariat avec Nikon pour ses missions). Malgré le caractère encombrant de ces derniers, leur présence dans une mission vers Mars est très probable, du fait de la nécessité de prises de vues extrêmement précises dans le cadre de celle-ci. L'appareil choisi pourra également être utilisé pour le suivi dentaire des spationautes.

Figure 14 : Image extraite d'une vidéo de l'astronaute américain Jeff Williams présentant l'appareil photo utilisé sur l'ISS



Source : Aldred « This is the camera gear that NASA use on the International Space Station », 2016.

Cette problématique illustre assez bien le paradigme qui domine la conception d'une mission spatiale de longue durée : le propos n'est pas tant sur la recherche exclusive d'objets légers et petits, mais plutôt sur l'optimisation de leur utilisation et leur choix le plus éclairé. Un objet plus ou moins encombrant (moins étant malgré tout préféré à plus), dont l'utilité sera indispensable ou multiple (versatile) aura sa place à bord : c'est en suivant ce raisonnement que la liste des objets embarqués sera établie.

2.3 Télémédecine bucco-dentaire

Le champ d'application de la télémédecine a été divisé par décret en 2010 en cinq types d'actes : la téléconsultation, la téléexpertise, la télésurveillance médicale, la téléassistance médicale et enfin la réponse médicale (un professionnel de santé assiste un collègue à distance pour la réalisation d'un acte).⁴²

Assez tôt, un parallèle a été établi entre l'isolement des spationautes dans l'espace, et celui vécu par les populations de zones rurales ou reculées : c'est ainsi que l'aérospatial et la télémédecine ont commencé à évoluer conjointement, et ce pratiquement depuis leurs naissances respectives. Avant même le premier envoi d'un être humain dans l'espace, la télémédecine a servi à déterminer si l'absence de gravité était compatible avec le fonctionnement du corps humain. Pour cela, des animaux ont été envoyés dans l'espace, attachés à des systèmes de monitoring qui transmettaient les données biométriques de l'animal directement aux scientifiques sur Terre via des liens télémétriques.

Dès 1964, la NASA lance l'**IMBLMS** (*Integrated Medical and Behavioral Laboratories and Measurement Systems*), un programme de monitoring en vol, qui fut mis en place lors des vols des programmes *Mercury* puis *Gemini*.

La nature-même des vols spatiaux a imposé le développement des techniques de télémédecine qui ont aussi trouvé des applications sur Terre. La nécessité de mettre en place des traitements médicaux d'urgences (même rudimentaires) en vol, sans compter sur l'unique expertise bancaire des membres de l'équipage, a poussé la NASA à placer ce programme au sommet de sa hiérarchie de financements. C'est finalement un rappel à l'ordre de la Maison Blanche sur les coûts du projet dans l'espace qui força l'agence à en imaginer une application sur Terre et donc moins coûteuse : c'est ainsi qu'est né en 1973

⁴² Décret n° 2010-1229 du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine.

le **STARPAHC** (*Space Technology Applied to Rural Papago Advanced Health Care*), un programme visant à relier des habitants de zones rurales isolées à des équipes médicales à distance. Cette initiative s'est poursuivie et s'est développée durant les décennies suivantes, et les technologies dérivées de celles mises en place par la NASA ont notamment été utilisées lors de catastrophes naturelles dans la dernière partie du XX^e siècle, ce qui a propulsé la télémédecine à un échelon politique : en réponse au désastre humain causé par le tremblement de terre en Arménie Soviétique (1988) , le « Spacebridge to Armenia », une des premières plaques tournante de coopération entre le bloc de l'est et de l'ouest, permis l'instauration, grâce aux technologies développées par la NASA, d'un support médical virtuel pour les communautés arméniennes touchées, ainsi qu'une communication transparente tout à fait inédite entre les acteurs internationaux. Cette initiative a de manière réciproque entraîné le développement de technologies utiles pour les vols spatiaux : établir une connection vidéo multi-site à travers plusieurs zones horaires, ou identifier la forme de média la plus appropriée pour transmettre des informations complexes sur les patients en toute sécurité.

Aujourd'hui, la NASA a intégré la télémédecine dans tous les vols spatiaux, ainsi que sur l'ISS et Artemis, et l'a orientée non-seulement vers l'amélioration de la communication et du diagnostic des astronautes, mais également à destination des experts médicaux sur Terre afin qu'ils prodiguent à distance certains traitements : l'autonomisation des capacités de traitement et de communication représente l'enjeu majeur du futur des vols spatiaux habités, mais également sur Terre pour les urgences à distance pour les patients.

La crise sanitaire actuelle causée par le **COVID-19** est une illustration contemporaine de l'intérêt de la mobilisation des technologies de la NASA sur Terre : depuis avril 2020, ses réseaux et ressources de télémédecine viennent en aide aux territoires les plus isolés. La toile numérique qu'elle a déployée au sol et dans l'espace lui permet également de monitorer l'impact environnemental de la crise. Ses ingénieurs ont également créé des respirateurs à destination des patients atteints. Cette crise réaffirme l'enrichissement réciproque des technologies terrestre et spatiales l'une pour l'autre.⁴³

La télémédecine bucco-dentaire s'est développée plus tardivement et dans une moindre mesure que son homologue de médecine générale, principalement en raison de la composante pratique de notre profession.

Loin d'être démocratisée aujourd'hui, elle est surtout mise en œuvre par des projets financés publiquement et trouve son champ d'application premier dans le tri et l'orientation de patients, ainsi que l'enseignement et la promotion de la santé bucco-dentaire auprès de populations isolées, et la formation de personnel de santé (infirmiers et aide-soignants dans des établissements accueillant des

⁴³ Simpson, Doarn, et Garber, « A brief history of NASA's contributions to telemedicine ».

populations à besoins spécifiques...). Le projet « e-dent » conduit par le CHU de Montpellier depuis 2014 combine ces aspects de la télémédecine bucco-dentaire : des consultations à distance ont été proposées à des résidents d'EPHAD, de Maison d'Arrêt ainsi qu'à des patients handicapés ; celles-ci sont permises par l'assistance d'un membre du personnel soignant sur place (Infirmier Diplômé d'État) qui réalise un enregistrement vidéo intra-buccal du patient à l'aide d'une caméra intra-orale, pour la manipulation de laquelle il a reçu au préalable une formation.⁴⁴

Cependant, et encore une fois dans le contexte de crise sanitaire actuelle, cette pratique est actuellement en pleine expansion dans tous les domaines mais également en dentisterie : en France, l'AP-HP a ainsi mis en place des systèmes de téléconsultation et d'appels téléphoniques et de visioconférences avec les patients suivis en service d'odontologie notamment, afin d'assurer une continuité des soins rendue difficile en présentiel par les mesures de distanciation sociale.

L'utilisation d'une caméra intra-orale lors des téléconsultations dans l'espace pourrait être une solution de choix pour les vols interplanétaires : malgré la latence de plusieurs dizaines de minutes qui empêcherait une communication en temps réel avec la Terre, un enregistrement vidéo intra-buccal de la zone concernée et directement envoyé à l'équipe au sol permettrait une diminution du temps de communication nécessaire pour l'obtention d'une expertise.

Dans l'espace, la télémédecine est largement utilisée en médecine générale et incorporée aux vidéoconférences de routine des spationautes avec les experts sur Terre (principalement pour le suivi de leurs constantes : fréquence respiratoire, température, tension artérielle...).

⁴⁴ Télémdecine 360, « Le projet E-Dent de télémdecine en Languedoc-Roussillon ».

3 : Dentisterie spatiale assistée numériquement : nécessité ou utopie ?

3.1 Prise en charge bucco-dentaire actuelle des spationautes

3.1.1 Pré-vol

Il est primordial que les spationautes soient en bonne santé, afin d'être capables de réaliser les tâches qui leur incombent durant le vol et le séjour sur Mars ; il est également nécessaire qu'ils reviennent sur Terre en bonne forme physique.

Leur santé orale est une de leur priorité et va de pair avec leur santé générale. Si la survenue de problèmes dentaires a été minime dans l'histoire des vols spatiaux habités, une étude récente a révélé que de tous les incidents médicaux, celui qui entrainerait le plus probablement le départ d'un membre de l'équipage de l'ISS serait un abcès dentaire.⁴⁵

Si le recrutement des astronautes s'effectue au travers de compétences scientifiques, techniques, linguistiques et relationnelles notamment, l'état de santé des candidats concourt au même titre à l'aboutissement de leur ambition. C'est à ce stade que la démarche de prévention médicale (et dentaire par extension) est initiée : en sélectionnant des individus en bonne santé, avec le moins de facteurs de risques possibles et une hygiène de vie optimale, le risque d'urgence médicale durant les vols sera limité aux seuls événements concomittents au vol.

3.1.1.1 Sélection des spationautes

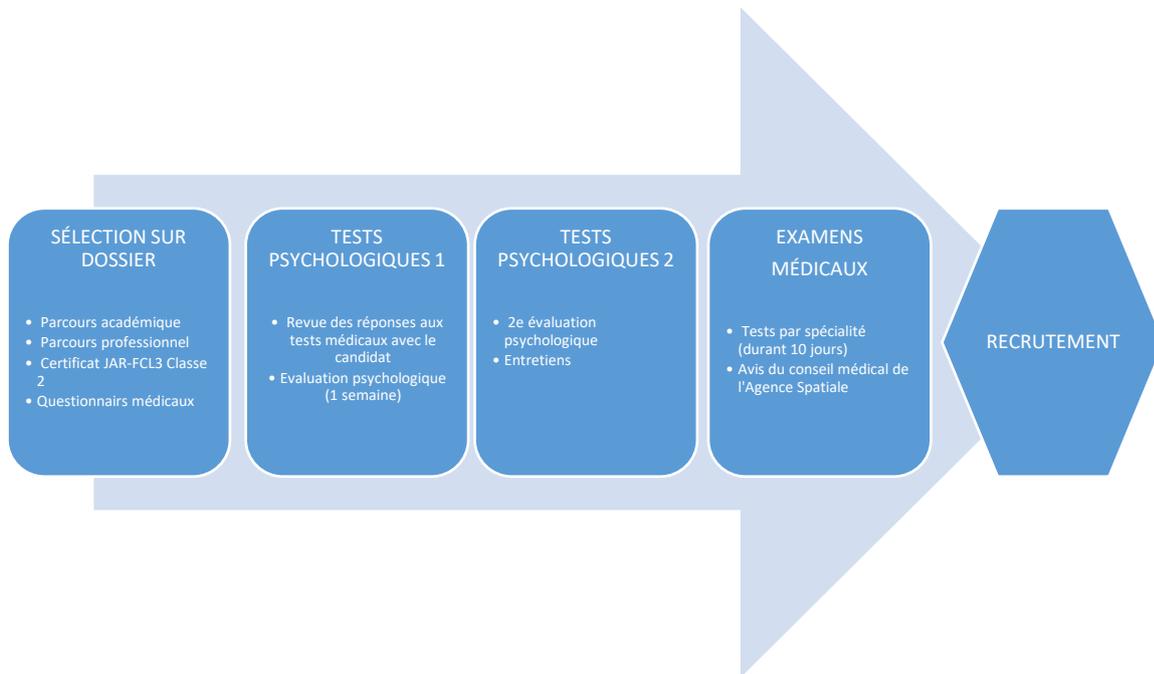
Devenir spationaute requiert le passage par un long processus de sélection extrêmement compétitif qui dure environ 10 mois et consiste en une succession d'examens psychologiques et médicaux, auxquels s'ajoutent des entretiens de motivation qui ne seront pas développés ci-dessous. Les candidats doivent avoir un équivalent de Master et trois ans minimum d'expérience professionnelle à la suite d'un cursus scientifique, dans des domaines tels que la physique, biologie, chimie, mathématiques, ingénierie ou médecine) ; une expérience en tant que pilote et avoir étudié dans l'aéronautique sont des valeurs ajoutées.⁴⁶

⁴⁵ Häuplik-Meusburger, Meusburger, et Lotzmann, « Emergency dental treatment on way to Mars ».

⁴⁶ European space agency, « Frequently asked questions on ESA astronauts ».

Le processus de candidature est organisé en quatre phases successives :

Figure 15 : Processus de recrutement médical et psychologique des spationautes



Source : Auteur, 2020.

Il est à noter que le candidat peut être exclu du processus de sélection à chacune de ces étapes, et qu'il ne sera finalement recruté qu'après les avoir toutes passées avec succès.

○ Sélection sur dossier :

Parmi les premiers formulaires d'inscription en ligne que doivent remplir les candidats figure un certificat médical consacré : le **JAR-FCL 3** (Joint Aviation Requirements-Flight Crew Licensing) de classe 2. Initialement requis pour les pilotes d'aviation privée – les critères médicaux finaux exigés pour les spationautes étant plus stricts – il est en réalité destiné à effectuer un premier écrémage au sein les candidatures.

Figure 16 : Contenu du certificat JAR-FCL 3 Classe 2



ESA Astronaut Applicant Medical Examination List

The following is a list of required medical examinations that must be performed on a European Astronaut Applicant by a physician (e.g. general practitioner).

These medical examinations are equivalent to the JAR-FCL 3 Class 2 medical examinations.

ESA Medical Examinations and Parameters:

1. Interview/Questionnaire evaluation of family history, personal history and medical history
2. General physical examination, including
 - a. all major organ systems, including skin
 - b. mobility of extremities, joints and spine
 - c. routine ears-nose-throat examination
 - i. Hearing Analysis
applicant must be able to understand correctly ordinary conversational speech at a distance of 2 meters from and with his back turned towards the examiner
 - d. basic neurology assessment
 - e. genito-urinary evaluation
 - f. for females: gynaecologic evaluation
 - g. resting heart rate and blood-pressure
3. Standard 12-lead Resting ECG
4. Blood analysis for Hemoglobin (Hb), Lipids and Cholesterol
5. Urine stick analysis, including Glucose, Leucocytes, Erythrocytes, Protein
6. Ophthalmologic Analysis (can also be performed by ophthalmologist or vision care specialist, e.g. optometrist)
 - a. vision in both eyes
 - b. distant Visual acuity with or without correction of 0.5 (6/12) or better in each eye separately and with both eyes 1.0 (6/6) or better
 - i. Refractive error shall not exceed +5 to -8 diopters
 - ii. Astigmatism shall not exceed 3 diopters
 - c. normal color perception (Ishihara or Nagel's anomaloscope)

Source : Agence spatiale européenne, « *ESA astronaut applicant medical examination list* », 2008.

Le candidat doit également être dépourvu de toute maladie, dépendance au tabac, à l'alcool ou à une quelconque drogue, de tout désordre psychiatrique, et être dans une forme physique en adéquation avec les critères de bonne santé correspondants à son âge (sans pour autant être un athlète de haut niveau, une musculature trop développée étant un désavantage en microgravité).⁴⁷

⁴⁷ Coisne, Grandsire, et Wilson, « European astronaut selection ».

○ Tests psychologiques :

Après avoir fourni lesdits certificats et passé cette première étape avec succès, les potentiels futurs astronautes subiront deux batteries de tests psychologiques (d'une durée respective d'une semaine chacune), suivies d'examens médicaux pour effectivement statuer sur leur état de santé actuel, et ainsi évaluer leur risque potentiel à développer des pathologies dans le futur.

○ Examens médicaux :

Ces tests sont réalisés selon les standards consacrés des spécialités suivantes :

- *Médecine générale*
- *ORL*
- *Ophthalmologie*
- *Pneumologie*
- *Hématologie*
- *Cardiologie*
- *Gastro-entérologie*
- *Urologie*
- *Endocrinologie*
- *Orthopédie*
- *Dermatologie*
- *Neurologie*
- *Psychiatrie*
- *Gynécologie-obstétrique*
- ***Odontologie (examen clinique suivi d'examens complémentaires : orthopanthomogramme et bilan long-cône)***
- *Nutrition*
- *Activité physique*
- *Quantité d'irradiation*

Auxquels s'ajoutent des tests spécifiques au candidat selon le besoin.⁴⁸

Ces examens ont pour but de détecter certaines pathologies qui constituent des critères d'exclusion des candidats au recrutement. Concernant la sphère orale, ne seront pas admis les :

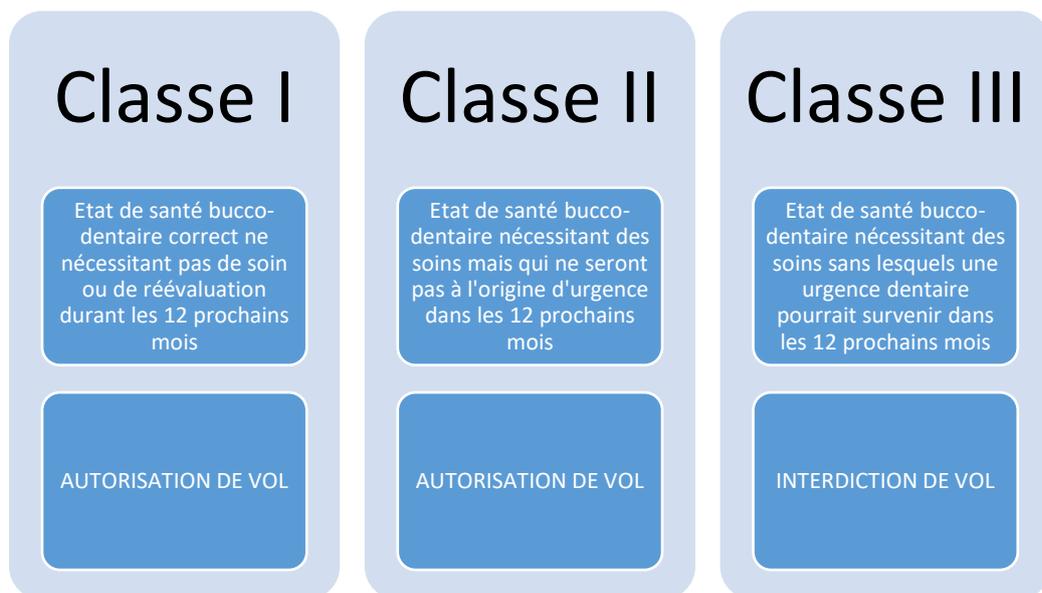
- « Défauts dentaires perturbant l'occlusion
- Prothèses amovibles dont la perte ne permettrait pas une mastication et élocution normales
- Prothèse amovible unilatérale risquant d'être avalée

⁴⁸ European space agency, « Psychological and medical selection process ».

- Édentement intra-arcade complet ou nombre de dent total insuffisants pour permettre une mastication et élocution normales
- Pathologies des machoires et structures associées (incluant le parodonte) ne pouvant être corrigées facilement ou pouvant compromettre à la performance du spationaute
- Malocclusions sévères empêchant une élocution/alimentation normales
- Pathologies dentaires (lésions carieuses, dysplasies dentinaire ou amélaire, fêlures symptomatiques, restaurations iatrogènes et défauts implantaires jusqu'à correction)
- Troisièmes molaires incluses/partiellement incluses potentiellement à l'origine de péri-coronarite, résorption dent adjacente ou problème parodontale, jusqu'à correction
- Traitement orthodontique actif. »⁴⁹

Les astronautes sont ensuite répartis en trois catégories selon leur état de santé bucco-dentaire :

Figure 17 : Répartition des candidats-astronautes en 3 classes de santé bucco-dentaire



Source : Auteur, 2020.

Seuls ceux appartenant aux classes I et II peuvent devenir astronautes mais il sera exigé une classe I avant d'être envoyé en mission.⁵⁰

⁴⁹ Bourgeois, Godard, et Mesgouez, « Odontologie et vols spatiaux de longue durée ».

⁵⁰ Zimmermann, « Extracting a tooth should be the last resort in space ».

À l'issue de ceux-ci, le dossier complet des candidats est évalué par le conseil médical de l'agence spatiale (*ESA Medical Board* pour l'Agence Spatiale Européenne) où siègent des spécialistes de tous les domaines étudiés : c'est lui qui statue de la décision finale d'enroller le candidat dans la suite du processus de recrutement, qui se poursuivra par un entretien d'embauche. Une fois recrutés, les spationautes commencent leur formation à proprement parler, qui durera entre 3 et 4 ans (avant de pouvoir effectivement participer à un vol spatial).

3.1.1.2 Prévention et suivi dentaires

La gestion de la santé bucco-dentaire des astronautes a jusqu'ici principalement consisté en une prévention et un monitoring accru en pré-vol. Cette approche aura évidemment toujours sa place dans la préparation des futures missions interplanétaires.

Suite à des réductions budgétaires au sein des agences spatiales, les cliniques dentaires y ont été fermées : aucun dentiste n'y exerce désormais directement, et les spationautes se tournent vers des praticiens privés pour leurs soins, conjointement à un suivi strict par les médecins de vols au sein de l'agence qui les emploie.

Après avoir passé avec succès les étapes de sélection, il est attendu des astronautes qu'ils maintiennent une hygiène orale méticuleuse, et effectuent un contrôle annuel chez leur dentiste. 18 à 21 mois avant le vol, ils subissent un examen « pré-vol » consistant en un examen clinique, une radiographie panoramique et des bite-wings : tout traitement alors à réaliser doit être effectué au minimum 90 jours avant le décollage.

Enfin, un dernier examen bucco-dentaire est réalisé entre le 90^e et le 30^e jour précédant le départ, afin de détecter une potentielle pathologie jusqu'ici asymptomatique, ou encore une blessure orale récente non-rapportée.

Ce protocole de suivi rapproché permet, d'après le Dr David Green (professeur de physiologie aérospatiale à King's College), de réduire le risque pour un spationaute de développer une maladie grave nécessitant des soins intensifs autour d'1 à 2 %.⁵¹

3.1.2 Per-vol

Si un maximum de précaution est pris avant la mission, les spationautes ne sont pas pour autant livrés à eux-mêmes et sans matériel de soin en vol. Un diptyque hommes-ressources est ainsi mis en place :

⁵¹ Roxby, « Treating medical emergencies in space ».

certaines membres de l'équipage sont formés aux soins d'urgence médicaux (et dentaires), et ont à leur disposition instruments et médicaments pour performer les actes nécessaires.

3.1.2.1 Crew Medical Officier

Une fois recrutés, les spationautes en devenir vont suivre une formation durant environ 3 ans et comportant plusieurs phases :

- Formation de base (« basic training » ; **16 mois**) : introduction aux fondamentaux des vols spatiaux, étude des systèmes des stations spatiales, formation à la survie, simulation de sortie extravéhiculaire, apprentissage du Russe (deuxième langue parlée sur l'ISS), acquisition de compétences en opérations robotisées.

Une fois cette phase complétée, les recrues deviennent astronautes et sont éligibles à l'affectation sur une mission : c'est elle qui détermine la nature de la suite de sa formation.

- Formation avancée (« pre-assignment training » ; **12 mois**) : approfondissement des connaissances sur le fonctionnement des Stations Spatiales, formation avec des partenaires internationaux (au *NASA Johnson Space Center* aux Etats-Unis, au *Roscosmos Gagarin Cosmonaut Training Center* en Russie ou encore au Centre Spatial de Tokyo au Japon).
- Formation spécifique à la mission (« mission-specific training » ; **jusqu'à 30 mois**) : formation avec l'équipage international autant que possible, afin d'apprendre à travailler avec l'équipe au complet selon les rôles assignés à chacun ; **sélection de deux astronautes pour la formation de CMO.**

La formation des spationautes se poursuit en vol et à leur retour sur Terre : des manuels et vidéos explicatives, téléconférences sont échelonnées dans leur emploi du temps tout au long de leur mission. Une fois revenus et après avoir complété une phase de « réhabilitation », ils retournent en formation avancée pour la mission suivante.⁵²

Lors de la dernière étape de formation, deux membres de l'équipage (qui n'exerçaient pas forcément de profession médicale avant de devenir spationautes) sont sélectionnés pour devenir les futurs référents médicaux en vol : ce sont les « **Crew Medical Officier** » (ou **CMO**).

⁵² European space agency, « Astronaut training ».

Si tout l'équipage reçoit une formation médicale minimum avant le départ, eux en suivront une plus avancée (pouvant aller jusqu'à 80 heures au total) en plus de celle spécifique incombée par leur mission et axée sur l'aspect opérationnel des procédures médicales (diagnostic, thérapeutiques, pharmacologie, protocole et équipements de soins, **actes dentaire...**).

La **formation dentaire** est divisée en une section pratique (« *dental procedures* ») d'une heure, et une section théorique d'une demi-journée. À la suite de celle-ci, le CMO doit être capable de réaliser les procédures suivantes : rescellement de couronne, anesthésie dentaire, avulsion dentaire, mise en place d'un matériau d'obturation provisoire. Les CMO seront toujours en contact avec une équipe d'experts médicaux au sol, et l'objectif de cette formation n'est pas d'en faire des praticiens indépendants (impossible en si peu de temps), mais plutôt des techniciens opérationnels aptes à réaliser les actes prescrits par les professionnels sur Terre.

Figure 18 : L'astronaute de l'ESA et CMO Alexander Gerst s'exerçant sur un mannequin durant sa formation médicale pré-vol



Source : Agence spatiale européenne, « Alexander practising on a mannequin », 2013.

En vol, le CMO pourra suivre une sorte de formation continue, ou du moins entretenir ses acquis grâce à un manuel de procédures disponible à bord, qui répertorie de manière exhaustive les procédures apprises en formation en adéquation avec le matériel médical présent à bord.

3.1.2.2 Kit dentaire et actes réalisables

Si le concept d'odontologie spatiale est apparu dès 1957 (mentionnée dans le premier guide médical de l'US Air Force), les premières missions spatiales étaient dépourvues de matériel de soin dentaire du fait de leur courte durée ainsi que de la limitation des quantités de matériel emporté, et l'incident de Romanenko mentionné précédemment a mis en lumière leur nécessité en vol.

Le matériel d'hygiène lui-même n'était pas inclus lors des toutes premières missions, et ce n'est qu'à la fin des années 60 lors des missions Apollo qu'un kit d'hygiène oral correct (dentifrice, brosse à dent et fil dentaire) a été incorporé à la trousse des astronautes.

Le projet « Mercury » (1961) ne comportait pas de kit médical à proprement parler, mais seulement des doses uniques de médicaments injectables. Le matériel médical embarqué a ensuite été significativement complété pour les missions « Gemini » (1965 à 1966), et une formation médicale correcte des spationautes avant vol fut également mise en place à partir du projet « Apollo ». ⁵³

Figure 19 : Contenu du kit médical des missions Apollo

	Apollo 7	Apollo 8	Apollo 9	Apollo 10	Apollo 11	Apollo 12	Apollo 13	Apollo 14	Apollo 15	Apollo 16	Apollo 17
Apollo Medical Accessories Kit											
Constant Wear Garment Harness Plug	---	---	---	---	---	---	---	---	3	3	3
ECG Sponge Packages	---	---	---	---	---	---	---	---	14	14	14
Electrode Bag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Attachment Assembly	12	12	12	12	20	20	20	20	100	100	100
Micropore Disc	12	12	12	12	20	20	20	20	50	50	50
Sternal Harness	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3
Axillary Harness	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Electrode Paste	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Oral Thermometer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pH Paper	1	1	1	1	1	1	1	1	1	None	None
Urine Collection and Transfer Assembly Roll-On Cuffs	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Lunar Module Medical Kit^[2]											
Rucksack	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Stimulant Pills (Dexedrine)	---	---	---	---	---	4	---	---	---	---	---
Pain Pills (Darvon)	---	---	---	---	---	4	---	---	---	---	---
Decongestant Pills (Acrifed)	---	---	---	---	---	8	---	---	---	---	---
Diarrhea Pills (Lomotil)	---	---	---	---	---	12	---	---	---	---	---
Aspirin	---	---	---	---	---	12	---	---	---	---	---
Band-Aids	---	---	---	---	---	6	---	---	---	---	---
Compress Bandages	---	---	---	---	---	2	---	---	---	---	---
Eye Drops (Methylcellulose)	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Antibiotic Ointment (Neosporin)	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Sleeping Pills (Seconal)	---	---	---	---	---	6	---	---	---	---	---
Anesthetic Eye Drops	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Nose Drops (Afrin)	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Urine Collection and Transfer Assembly Roll-On Cuffs	---	---	---	---	---	6	---	---	---	---	---
Pronestyl	---	---	---	---	---	12	---	---	---	---	---
Injectable Drug Kit											
Injectable Drug Kit Rucksack	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
Lidocaine (cardiac)	---	---	---	---	---	8	---	---	---	---	---
Atropine (cardiac)	---	---	---	---	---	4	---	---	---	---	---
Demerol (pain)	---	---	---	---	---	2	---	---	---	---	---

Source : National aeronautics and space administration, « Apollo medical kit », 1969.

⁵³ Emanuelli, « Evolution of NASA Medical Kits : From Mercury to ISS ».

Ce n'est qu'au milieu des années 1970, lors des missions habitées effectuées sur la première station spatiale américaine « Skylab » (1973 à 1979) que du matériel de soins dentaires (faisant partie d'un kit médical complet) fut embarqué en vol : l'« **Inflight Medical Support System** » (INMSS), contenant 1300 ustensiles et pesant pas moins de 50 kilogrammes et destiné à la réalisation de tous les soins répertoriés dans les protocoles médicaux, y compris dentaires. Le kit était alors accompagné d'un manuel explicatif ainsi que des radiographies intra-orales de l'ensemble de l'équipage réalisées en pré-vol. C'est également lors d'une mission *Skylab* que pour la première fois un médecin de formation, Joe Kerwin, compta parmi l'équipage.⁵⁴

Figure 20 : Contenu du kit dentaire de l'Inflight Medical Support System des missions Skylab.



DENTAL KIT					
Item No.	Description	Qty. in Kit	Item No.	Description	Qty. in Kit
1	Mirror/light	1	10	Needle, 27 gage x 1 ³ / ₁₆ in. long	3
2	Scaler, curette	1	11	Needle, 27 gage x 1 ¹ / ₂ in. long	3
3	Elevator	1	12	Syringe	1
4	Bone saw assy (Gigli)	2	13	Forceps, mandibular— anterior	1
5	Applicator 1-2	1	14	Forceps, mandibular— posterior	1
6	File	1	15	Forceps, maxillary— posterior	1
7	Dental restorative material	8	16	Forceps, maxillary— anterior	1
8	Gauze, 1/4 in. x 36 in. long	3			
9	Lidocaine (HCL) ampules	6			

Source : Johnston et Dietlein, *Biomedical results from Skylab*, 1977.

⁵⁴ Johnston et Dietlein, *Biomedical results from Skylab*.

La navette spatiale américaine (communément appelée « Space shuttle ») qui opéra de 1981 à 2011, était également pourvue de son propre kit médical : le « **Shuttle Orbiter Medical System** » (SOMS) capable d'apporter un soutien médical à sept membres d'équipages durant deux semaines. Il consistait en deux compartiments séparés : un premier comportant un kit de médicaments et matériel de bandages/pansements (« **Medications and Bandage Kit** » ou **MBK**), et un second avec un kit d'urgence médicale (« **Emergency Medical Kit** » ou **EMK**). Un kit similaire avait alors été développé pour les vols de longue durée à bord de la station spatiale russe « Mir » dans le cadre du « Shuttle-Mir program ». ⁵⁴

On retrouve aujourd'hui des brides de cette évolution, puisque la Station Spatiale Internationale comporte deux kits médicaux, respectivement russe et américain. Ils sont la synthèse de l'expérience collectée au cours des missions habitées depuis le premier vol de l'Homme dans l'espace, et permise par l'accroissement de durée des missions. Ils prennent en compte toutes les urgences médicales pouvant se produire en vol, mais la contingence d'espace et de poids a contraint ceux qui les conçoivent à choisir le matériel en fonction de l'occurrence de certaines pathologies nécessitant des soins, et pouvant se déclarer sur une période de 6 mois sans suivi médical professionnel. La NASA a mis en place l'**Integrated Medical Model (IMM)** afin de les concevoir. En dentisterie, il a ainsi été statué de la probabilité (en homme-année) des évènements suivants :

- *Lésion carieuse = 0,39*
- *Abcès dentaire = 0,02*
- *Pulpite et/ou exposition pulpaire = 0,02*
- *Expulsion/perte dentaire = 0,003*

Le kit dentaire à bord de la Station Spatiale Internationale aujourd'hui se compose de :

- Miroir
- Seringue d'anesthésie (lidocaïne + épinéphrine)
- Spatule à bouche
- Sonde dentaire
- Dépose-couronne
- Daviers (x2)
- Eugénol
- Ciment provisoire (base + catalyseur)
- Fil dentaire
- Élévateurs (x2)
- Miroir à bouche

pour l'instant pas été conduites) ainsi que des médicaments à date de péremption très longue (idem que pour les denrées alimentaires) seront nécessaires afin de garantir une prise en charge médicale adéquate des spationautes durant plusieurs années.

Enfin, il est assez évident que ce kit sera insuffisant dans le cadre des futures missions interplanétaires : elles devront être équipées non-seulement de tout le matériel de soin nécessaire, mais également de méthodes diagnostic de pointes afin de continuer à assurer en vol un suivi aussi efficace que sur Terre. L'impossibilité de retour rapide sur Terre obligera l'équipage à compter moins sur une communication directe avec les experts au sol, que sur leurs propres compétences et les moyens dont ils disposent à bord : la présence d'un médecin de formation à bord semble alors une nécessité.⁵⁶

3.1.2.3 Monitoring en vol

La première question que l'on peut se poser est la suivante : lorsque l'eau flotte dans l'air comme tout autre corps, et dans l'impossibilité de cracher sans que le produit de votre brossage ne vous revienne dessus, comment se brosser les dents ?

L'astronaute canadien Chris Hadfield apporte la solution dans une vidéo publiée en 2013 : c'est en... avalant le dentifrice, les résidus du brossage ainsi que l'eau de rinçage après avoir mouillée sa brosse à dent pour la nettoyer « It's edible ! Won't kill you... » dit-il, non sans une expression de léger dégoût.

La procédure est la suivante :

- Faire sortir une goutte de la gourde d'eau afin de mouiller la brosse à dent
- Déposer une faible quantité de dentifrice sur celle-ci (il faudra l'avaler donc inutile d'en mettre trop !)
- Se brosser les dents
- Reprendre un peu d'eau et tout avaler
- Mouiller à nouveau sa brosse à dent et avaler l'eau résiduelle afin de la nettoyer

Il explique l'importance d'insister sur les dents postérieures et que la durée du brossage doit être de durée égale à la « chanson d'anniversaire » ! Cela met en évidence la sensibilisation à l'hygiène orale des spationautes.⁵⁷

⁵⁶ Emanuelli, « Evolution of NASA Medical Kits : From Mercury to ISS ».

⁵⁷ Hadfield, *How to brush your teeth in space*.

Figure 21 : Chris Hadfield se brossant les dents sur l'ISS



Source : VideofromSpace , « How to brush your teeth in Space », 2013.

La NASA avait initialement mis au point un dentifrice destiné aux vols spatiaux qui ne moussait que très peu et totalement comestible : le « Nasadent », inventé par le Dr Ira L. Shannon, consultant pour le Johnson Space Center à l'époque. Cependant, son goût n'a été que peu apprécié par les spationautes qui lui préférèrent les dentifrices classiques (pouvant être avalés également). Du fait qu'il fut inutile de l'avalier, une utilisation de ce dentifrice par les enfants, les patients alités, les personnes avec handicap moteurs ou souffrant paralysie faciale a cependant été suggérée.⁵⁸

⁵⁸ National aeronautics and space administration, « Ingestible toothpaste ».

En ce qui concerne le suivi médical des astronautes, il est pris en charge avant et pendant le vol par un référent, appelé le « flight surgeon ». Des téléconsultations sont régulièrement organisées entre les membres de l'équipage et leur médecin au sol, et les soins techniques ainsi que les examens de suivi sont assurés par les CMO (cf. figure 22).

Figure 22 : Examen bucco-dentaire du commandant Pete Conrad par le CMO Joseph Kerwin lors de la mission Skylab 2



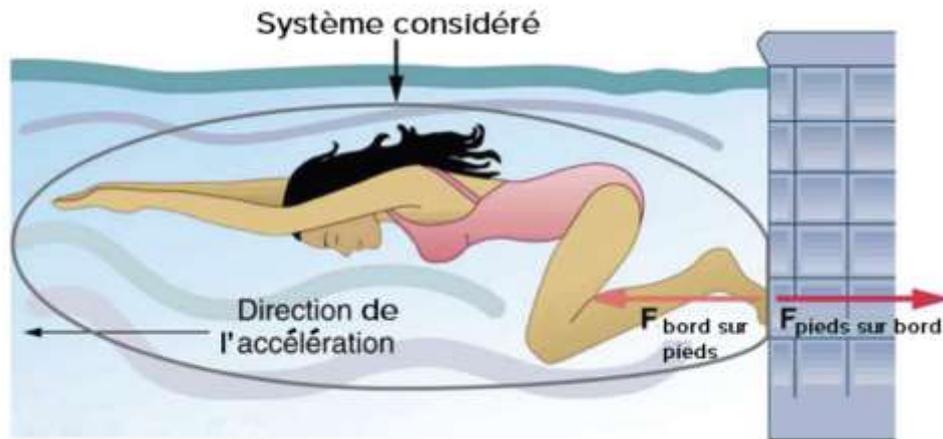
Source : National aeronautics and space administration, « *Skylab 2 commander Pete Conrad undergoes a dental examination by medical officer Joseph Kerwin in the Skylab Medical Facility* », 1973.

Cependant et comme illustré sur cette photo, un simple examen bucco-dentaire n'est pas chose aisée dans l'espace : le commandant Conrad s'est de lui-même retourné de haut en bas pour faciliter le travail de son collègue le CMO Kerwin, car en microgravité, le simple contact des deux hommes les enverrait chacun dans une direction opposée.

Si dans le cas d'un objet solide comme le corps humain sa cohésion n'est pas compromise par l'impesanteur et la répercussion de l'absence de gravité uniquement interne (sur les systèmes non-cohésifs comme les fluides et les gaz), elle sera en revanche appliquée à tous les objets entre eux : c'est la troisième loi de Newton ou principe d'action-réaction (« Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le

corps B ; ces forces ont la même droite d'action, des sens opposés et la même norme » traduit du latin en français par Émilie du Chatelet⁵⁹).⁶⁰

Figure 23 : Illustration de la Troisième Loi de Newton



Source : Khan academy, « Qu'est-ce que la troisième loi de Newton ? ».

L'accélération dont bénéficie la nageuse pour s'élancer est de sens opposé et égal à la force qu'elle exerce contre la paroi du bord de la piscine. Le même phénomène se produirait entre deux corps dans l'espace, mais en absence de gravité, aurait pour conséquence de les envoyer chacun dans une direction opposée. Ainsi, la contention non-seulement des spationautes mais aussi du matériel est nécessaire pour assurer la sécurité et le bon déroulement des soins.

Sur l'ISS, des entretiens appelés **RMP** (Réunion Médicale Privée, sur une ligne spécifique) entre l'équipe médicale au sol et les CMO ont lieu quotidiennement les premiers jours des missions, puis de manière hebdomadaire en l'absence de sollicitation de l'équipage. Qu'en est-il alors du secret médical durant et à la suite de ceux-ci ? Un rapport est systématiquement réalisé, mais n'inclut qu'un minimum d'information uniquement dans le cas où l'évènement médical engendre une répercussion sur la mission.⁶¹

⁵⁹ Breteuil, *Exposition abrégée du système du monde*.

⁶⁰ Esterle, « Pesanteur et impesanteur : une introduction à la microgravité ».

⁶¹ Seedhouse, « Interplanetary Health Care ».

3.2 Champ d'application des technologies numériques dans l'espace

3.2.1 Diagnostic

3.2.1.1 Radiographie

Lorsqu'en 1895 le physicien allemand Wilhem Roentgen découvre les rayons X et réalise le tout premier cliché radiographique de la main de sa femme, il ne se doute pas de l'impact de sa découverte sur l'ensemble de la sphère médicale, ni de l'évolution fulgurante qu'elle connaîtra le siècle suivant. Aujourd'hui largement utilisée en dentisterie comme en médecine, la radiographie est un support démocratisé et ce, quelque soit la spécialité concernée. Outil nécessaire comme examen complémentaire permettant de confirmer puis d'estimer un diagnostic clinique, support médico-légal ou de suivi, le cliché radiographique est un élément essentiel d'une prise en charge bucco-dentaire optimale.

Aujourd'hui, la radiographie dentaire est majoritairement représentée par des systèmes muraux et très imposants, peu compatibles avec les exigences d'un vol spatial que nous avons énoncées précédemment.

Développés au début des années 1990 pour une utilisation en médecine militaire et pour des missions humanitaires, des systèmes radiologiques portatifs ont vu le jour en dentisterie. Depuis quelques années, le recours à ces systèmes dans les cabinets privés a augmenté.

Figure 24 : Générateur radiologique portatif Kavo NOMAD™ Pro 2



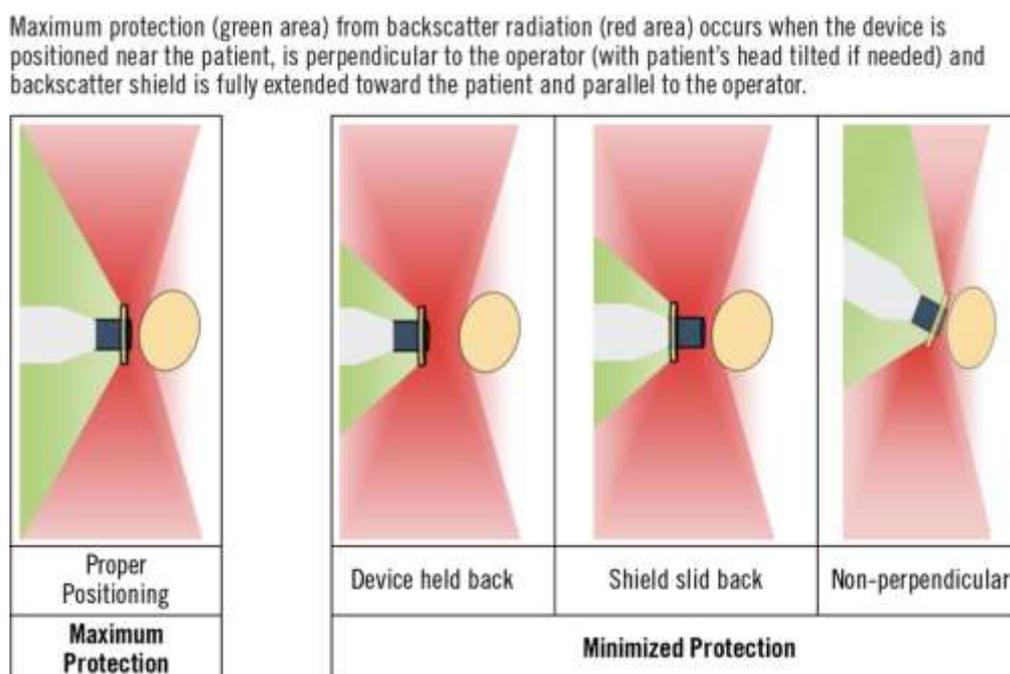
Source : Kavo Kerr, « NOMAD™ Pro 2 », 2018.

Ci-dessus un exemple de système portatif de type « pistolet » (type recommandé par la *Food and Drugs Administration* aux Etats-Unis), il en existe un autre type semblable à une « caméra ». Pesant moins de

3 kilogrammes et sans fil, l'utilisation de ce type d'outil pourrait être envisagé pour lors des vols interplanétaires. L'acquisition se fait à l'aide d'un capteur numérique RVG (RadioVisioGraphique) connecté à un ordinateur possédant un logiciel de lecture.

Si leur ergonomie est mise en avant, en obligeant le praticien à rester au fauteuil ils défient le concept de « zone contrôlée ». La protection de l'opérateur face aux rayons X est ainsi assurée par le bouclier de rétrodiffusion (auréole dorée sur l'image).

Figure 25 : Instruction du constructeur sur le positionnement de l'appareil garantissant un maximum de radioprotection



Source : Kavo Kerr, « NOMAD™ Pro 2 », 2018.

Pour cela, un positionnement de l'appareil perpendiculairement au capteur est nécessaire afin de maintenir la zone d'irradiation dans un plan horizontal. L'ajustement doit être fait en réglant le siège et la position du patient, et non l'opérateur, pouvant résulter en une sortie du champ de protection de celui-ci. En vol, il faudrait donc contentionner l'opérateur ainsi que le patient afin d'éviter toute exposition non-souhaitée, et former le CMO à l'utilisation de ces outils.

Figure 26 : Prise de cliché intra-oral avec système radiographique portatif



Source : Kavo Kerr, « NOMAD™ Pro 2 ».

De nombreuses études ont montré que, dans des conditions d'utilisation adéquates, les appareils radiographiques mobiles n'entraînaient pas d'augmentation significative en termes d'exposition aux rayonnements en comparaison des systèmes muraux, et étaient donc sûrs d'utilisation.

Les désagréments majeurs avancés avec ce type de technique étaient la fatigue qu'ils occasionnent pour l'opérateur qui doit en soutenir le poids durant le positionnement et l'acquisition des clichés. Ce type de contingence n'entrerait pas en compte en vol du fait de l'apesanteur.⁶²

3.2.1.2 Examen intra-oral

La principale avancée technique lors des missions interplanétaires sera la présence de caméra intra-orale, qui complètera l'examen visuel : effectué dans le cadre d'un suivi dentaire ou en cas de symptomatologie, l'examen clinique buccal pourra alors être complété par l'utilisation de la caméra intra-orale.

Elle présente plusieurs avantages : préciser/mettre en lumière le diagnostic de lésions précoces ou invisibles à l'œil nu (cf. systèmes de trans-illumination, fluorescence et lumineux décrits

⁶² Rothmund, « Handheld vs. conventional wall-mounted x-ray units ».

précédemment), enregistrer une séquence vidéo localisée sur la zone concernée, et permettre un éclairage local de la zone pour une meilleure visualisation.

L'enregistrement vidéo pourrait avoir plusieurs applications : être agrandi et visionné par le CMO afin d'affiner son examen visuel sur place, ou envoyé pour expertise à l'équipe au sol et ainsi pallier l'impossibilité de communication en temps réel.

3.2.1.3 Télé-expertise

Ces dernières années, les technologies de communications entre la Terre et l'espace ont connu un développement fulgurant : en 2017, les premiers live en 4K étaient réalisés de l'ISS. Ils étaient notamment utilisés pour réaliser les consultations médicales avec les experts au sol et pour les études de monitoring des spationautes. Dans le cadre de l'étude de l'impact de la redistribution des fluides sur la vision, le spationaute Thomas Pesquet et d'autres membres de l'équipage se sont adonnés à des examens oculaires, des scanners ultrasonores avec la guidance en direct des médecins sur Terre.

Figure 27 : Peggy Whitson et Jack Fischer communiquant directement de l'ISS avec les panélistes de la National Association of Broadcasters via une technologie de streaming en ultra haute-définition 4K



Source : National aeronautics and space administration, « First 4K live stream from Space and Eye study for crew », 2017.

Même si cette technologie, délivrant des images d'une résolution exceptionnelle, pourrait être embarquée en vol lors d'une mission vers Mars, il est à noter que la taille d'un fichier augmente avec la qualité de celui-ci. Le débit réduit d'envoi des données ainsi que le délai de latence dans la communication Terre-Vaisseau ou Terre-Mars rendrait impossible leur recours pour le même type d'application. Une assistance en directe via caméra intra-orale en mode vidéo sera donc impossible en raison du temps de latence de plusieurs dizaines de minutes entre l'envoi du message de Mars et sa réception sur Terre. L'expertise de l'équipe médicale au sol ne sera sollicitée qu'en dehors des actes de soins : en amont pour guider les CMO quant aux procédures à suivre ou revoir un protocole, confirmer ou infirmer un diagnostic ; et en aval pour évaluer les soins réalisés, donner des recommandations de suivi.

Ainsi, on peut imaginer une utilisation de la télémédecine plutôt comme une expertise ponctuelle : le rôle de l'équipe d'expert sur Terre évoluerait de l'instance décisionnelle médicale à celui d'assistance de l'équipage.

Les médecins pourraient également recevoir et analyser les clichés radiographiques et prises de vues intra-orale envoyées par l'équipage et émettre un avis ou confirmer un diagnostic, et les communications « classiques » réservée pour les discussions sur les protocoles et les prises de décisions en cas de doute du CMO.

3.2.2 Traitement

3.2.2.1 Optimisation du kit de soin

Si la demande médicale lors d'une mission interplanétaire de plusieurs années sera plus importante que lors des précédentes missions spatiales, la contingence de poids et de taille du matériel embarqué demeure plus que jamais présente.

Cette demande est également à tempérer en prenant en compte les compétences de l'équipage : ils seront certes sûrement plus formés encore que leurs aïeux à la réalisation de diagnostics et actes médicaux, mais un sur-ajout de matériel complexifierait grandement les procédures et, *in fine*, serait préjudiciable pour leur bon déroulement.

C'est donc un équilibre subtil qu'il faudra tenter d'achever, entre l'embarquement de matériel nécessaire, suffisant et qui couvrira tous les besoins médicaux lors de ces deux années et demie, et l'évitement à tout prix d'un encombrement superflus.

Actuellement, le kit de matériel pour la réalisation des soins dentaires tient dans une trousse de 15 par 20 centimètres.

Aucun instrument rotatif ne fait actuellement partie du matériel dentaire embarqué, jugés inutiles pour missions de 6 mois (les lésions carieuses sont excavées manuellement et un matériau d'obturation temporaire y est placé). Lors d'une mission sur Mars, le risque de pulpite ou de nécrose suite à une obturation carieuse au-delà de quelques mois obligerait l'équipage à recourir à une extraction. La présence de matériel rotatif et la formation de l'équipage à leur utilisation semble nécessaire.

Aussi, une durée supérieure à six mois impliquera la réalisation de séances de suivi et de maintenance dentaire et parodontale en vol : du matériel ultrasonore pour effectuer des détartrages biannuels sera également nécessaire. On peut imaginer un système fonctionnant selon le même procédé que ces unités dentaires dites « mobiles ».⁶³

Figure 28 : Unité dentaire portable (détartreur, rotatifs, aspiration et lampe à photopolymériser



Source : Dentaltools, « Greeley GUP-206 Unité dentaire portable détartreur dentaire + lampe à polymériser LED ».

⁶³ Bourgeois, Godard, et Mesgouez, « Odontologie et vols spatiaux de longue durée ».

3.2.2.2 Imprimante 3D

Après plus de 30 000 heures en simulation via vols paraboliques sur Terre, la première imprimante 3D, fruit d'un partenariat entre l'entreprise californienne **Made in Space** et la **NASA**, a été livrée en Septembre 2014 par le cargo « Dragon » de *Space X* (qui assure les livraisons vers l'ISS).

Baptisée « **Zéro-G Printer** », cette innovation avait pour objectif de permettre aux cosmonautes la fabrication de pièces de rechange sans avoir à attendre une livraison depuis le sol (via *fabrication additive* utilisant la technique *FFF* « Fused Filament Fabrication »). Le commandement de l'appareil s'effectue sur place, mais une commande du sol a ensuite été rendue possible. Ce projet, vecteur d'indépendance pour les équipages à l'époque, portait déjà en lui l'idée d'applications multiples pour une conquête spatiale plus lointaine : fabrication de médicaments, nourriture... et ainsi possiblement s'affranchir des contingences de date de péremption et de manque de matériel particulier sur Mars.⁶⁴ Depuis, les imprimantes 3D se succèdent sur l'ISS (Epson 800 printers, HP OfficeJet 5740 Printer...) et l'utilisation de cette technologie sur la station est devenue ubiquitaire, de même que l'**AMF (Additive Manufacturing Facility)** de *Made in Space*, présente de manière permanente. Une technologie a été ajoutée à l'AMF sur l'ISS, le « **Polymer Recycler** », permettant de recycler et réutiliser les matériaux imprimés par l'AMF mais aussi des sacs plastiques par exemple ; ces matériaux peuvent ensuite être réutilisés par la machine pour une nouvelle impression 3D.⁶⁵

Le dernier projet en date de *Made in Space*, dont le lancement est prévu en 2022, est un vaisseau spatial (appelé « **Archinaut** ») qui se fabriquera et s'assemblera en orbite terrestre basse (imprimant des composants pouvant aller jusqu'à 10 mètres). La possibilité de fabriquer et assembler de novo un vaisseau en orbite basse (ou simplement hors atmosphère terrestre) présente un intérêt évident pour les missions interplanétaires.⁶⁶

⁶⁴ Prater et al., « 3D printing in zero G technology demonstration mission ».

⁶⁵ Kite-Powell, « See How This Printer Works in Zero Gravity on the International Space Station ».

⁶⁶ Made in space, « Spaceflight Missions ».

Figure 29 : L' AMF et son utilisation sur la Station Spatiale Internationale



Source : Made in space, « *Made in space's* additive manufacturing facility celebrates first anniversary among the stars » , 2015.

Dans le contexte de crise sanitaire actuelle due à l'épidémie de **Covid-19**, *Made In Space* a, via ses infrastructures en Floride et en Californie, utilisé la fabrication additive pour imprimer des centaines de visières à destination du personnel soignant.⁶⁷

Le succès de ces expériences a ouvert la voie au développement de l'impression 3D : quelques années plus tard, une collaboration entre les entreprises *Techshot* et *nScript* résulta en l'impression d'un cœur humain 3D à partir de cellules souches humaines en vol parabolique (simulant l'absence de gravité). Les deux entreprises américaines ont ensuite mis au point le « **3D BioFabrication Facility** » (ou **BFF**), un système de bio-impression à destination de l'ISS, et permettant l'impression de tissus épais et d'organes à partir de cellules souches adultes : le système est composé d'une imprimante 3D, le **BAT** (*Bio Assembly*), et d'un système de mise en culture des cellules, l'**ADSEP** (*Advanced Space Experiment Processor*), également développé par *TechSpot*. Utilisant la technique « **SmartPump** » développée par *nScript*, le BAT Bioprinter est doté d'une précision extrême (contrôle volumétrique de 100 picolitres et utilise des buses extrafines de 10 microns pour l'extrusion de biomatériaux).

La bio-impression ouvre le champ des possibles de la médecine spatiale de manière considérable, et représente une extraordinaire avancée à l'horizon des missions interplanétaires.⁶⁸

⁶⁷ Made in space, « Made In Space 3D Printing PPE to Help in the Fight against COVID-19 ».

⁶⁸ Michelle, « Zero gravity bioprinter ».

3.3 Gestion du facteur humain

3.3.1 Sélection et suivi pré-vol renforcés

L'attention portée à ces étapes devra naturellement être renforcée : imaginer un protocole selon lequel tous les spationautes seraient considérés comme des patients à risque élevé pourrait être une solution : un suivi parodontal tous les 3 mois, une augmentation de la fréquence des suivis en pré-vol, des séances d'enseignement à l'Hygiène Orale répétées et l'enseignement pour tous du tableau de signes cliniques basiques, afin de permettre à l'ensemble de l'équipage de gagner en autonomie.

3.3.2 De technicien à praticien semi-dépendant

Finalement et étant donné la spécificité des soins dentaires au sein de l'ensemble de la formation médicale, la présence d'un spécialiste à bord est une question légitimement posée : un « Crew Dental Officier » pourrait ainsi être présent à bord de l'équipage qui volera vers Mars. Dentiste de formation ou ayant reçu une formation spécifique et approfondie en dentisterie, il sera le vecteur d'une autonomie relative de l'équipage (rendue nécessaire par le temps de latence de communication avec la Terre) en termes de prise de décision – si urgence absolue – et de réalisation des soins. Il sera également en charge du suivi à bord, incluant un contrôle et un détartrage de l'ensemble de l'équipage tous les 6 mois minimum.

Finalement, c'est peut-être un système hybride qui serait le plus pertinent : suivi et examens réalisés aléatoirement en totale autonomie et avec l'expertise de l'équipe au sol.

3.3.3 Protocole de prise en charge d'urgence simulé

Afin d'évaluer au mieux la demande en matériel, ressources et compétences humaines, une équipe européenne a mis au point un protocole de soin dentaire prospectif, basé sur la simulation d'un traumatisme physique. Comme le montre le cliché ci-dessous, des chutes ou collisions peuvent aisément se produire, dans le vaisseau ou lors de sorties extravéhiculaires.

Figure 30 : L'astronaute Charlie Duke se relevant après être tombé sur la Lune, lors de la mission Apollo 16 en 1972



Source : National aeronautics and space administration, « Charlie Duke getting up after having fallen over on the Moon during Apollo 16 moonwalk in 1972 », 1972.

Calquée sur les dernières recommandations en vigueur sur Terre pour un problème dentaire donné, la procédure a été imaginée pour l'espace : à titre d'exemple, l'élément déclencheur serait ici une chute entraînant la blessure d'un membre de l'équipage.

Figure 31 : Accident imaginaire au sein d'une station sur Mars, où un membre de l'équipage perd une restauration dentaire



Source : Häuplik-Meusburger, Meusburger et Lotzmann, « Emergency dental treatment on the way to Mars », 2016.

En résulte une douleur importante empêchant l'astronaute blessé de continuer la performance des tâches qui lui incombent, et nécessitant donc un soin.

S'en suit alors une consultation médicale et un diagnostic avec l'équipe médicale au sol, après laquelle le spationaute (ou le CMO) réalise un scan intra-oral afin de créer un fichier 3D de la dent touchée et des tissus environnants.

Figure 32 : Le membre de l'équipage blessé scannant la zone blessée à l'aide d'une caméra intra-orale



Source : Häuplik-Meusburger, Meusburger et Lotzmann, « Emergency dental treatment on the way to Mars », 2016.

Une fois le fichier reçu sur Terre, une équipe d'experts dentaires évalue les données et design un modèle virtuel de la prothèse dentaire requise (CAO). Ces données sont ensuite de nouveau transmises à la base sur Mars, où une imprimante 3D les reçoit et fabrique automatiquement la restauration (à base de céramique, résine ou autre matériau).

Figure 33 : Expert dentaire sur Terre analysant et créant la restauration virtuelle ainsi qu'un guide de positionnement avant de renvoyer les données vers la base sur Mars



Source : Häuplik-Meusburger, Meusburger et Lotzmann « Emergency dental treatment on the way to Mars », 2016.

L'astronaute blessé ou le CMO enduit la pièce de ciment de scellement et l'insère en bouche après l'avoir préalablement essayée, puis effectue les réglages occlusaux à l'aide du matériel dentaire présent à bord.

Afin de démontrer la faisabilité d'une telle chaîne de traitement dentaire avec assistance à distance, une simulation de ce type de protocole a été effectuée dans des « conditions martiennes » lors de la mission « **AMADEE-15** » menée par l'Austrian Space Forum en 2015.⁶⁹

Figure 34 : Astronaute analogue utilisant une caméra intra-orale pour enregistrer la zone affectée lors d'une simulation



Source : Häuplik-Meusburger, Meusburger et Lotzmann, « Emergency dental treatment on the way to Mars », 2016.

Si ces procédures ont effectivement démontré leur viabilité dans l'espace, le facteur humain reste la principale variable dans l'équation. Aussi, des recherches approfondies sur l'utilisation de l'impression 3D doivent encore être entreprises en dentisterie pour les vols de longue durée, afin d'encore maximiser la sécurité des procédures et l'autonomie de l'équipage (en concevant par exemple des guides d'injection personnalisés pour anesthésie tronculaire par exemple).

⁶⁹ Häuplik-Meusburger, Meusburger, et Lotzmann, « Emergency dental treatment on way to Mars ».

Conclusion

Comme ce fut le cas lors du premier vol spatial par un être humain, le caractère inédit des missions interplanétaires habitées s'accompagne inévitablement d'un grand nombre d'incertitudes ; les paramètres pris en compte pour les planifier s'appuient sur deux piliers : l'expérience acquise au cours des missions spatiales d'une part et des pronostics scientifiques probabilistes d'autre part.

Cette approche présente inévitablement des limites : ces données ne sont en effet que la projection sur une durée plus longue d'informations recueillies lors de missions courtes, or (et surtout en ce qui concerne le vivant) une simple extrapolation ne permet pas de dresser un portrait exhaustif et le plus certain possible de l'évolution des paramètres biologiques en vol. Au même titre que l'on apprend qu'un enfant ne peut pas être considéré comme un « adulte en réduction » concernant les doses d'un médicament qui lui est administré, la variable temps comporte les mêmes contingences : les systèmes humains sont complexes, et leurs fonctionnements ne peuvent être envisagés selon une estimation probabiliste suivant des règles de proportionnalité.

Comme au sein de tout système dynamique et vivant, le risque zéro n'existe pas, et l'équipage qui voyagera au-delà de notre satellite lunaire le fera uniquement sous-couvert d'estimations jugées « raisonnables » par un consortium scientifique.

C'est donc toujours la prévention qui sera le fer-de-lance de la stratégie de protection et de suivi des spationautes : le changement de paradigme qui s'opère dans la préparation des missions interplanétaires est en réalité plus une transition d'une stratégie préventive probabiliste et minimale vers une stratégie pro-active, accrue et millimétrée ; l'approche a changé de forme mais pas de fond.

Dans cette démarche, ce sont les technologies numériques qui permettent de préciser la composante probabiliste en réduisant la part des inconnues, en servant de support à l'équipage en vol et permettant un flux de données avec une équipe d'expert au sol.

Si c'est bien l'humanité qui s'aventurera dans notre système solaire, c'est un dyptique homme-machine qui accomplira la « conquête de l'espace ».

Bibliographie

- Adent. « La radiographie dentaire », 2010. <https://adent.ch/radiographie-dentaire/>.
- Barratt, M. R., E. Baker, et S. L. Pool, éd. *Principles of clinical medicine for space flight*. 2nd ed. New-York: Springer-Verlag, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9889-0>.
- Bertzbach, S., Z. Manfred, et F Bertzbach. « Systèmes de diagnostic ». Consulté le 26 mai 2020. https://www.3mc-concept.fr/wp-content/uploads/2018/05/Diagnostik_Set_FR_WEB_680014-2.pdf.
- Bibas, D. « Utilisation du smartphone en photographie dentaire ». Thèse d'exercice, Université d'Aix-Marseille, 2019. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02183825>.
- Bourgeois, T., B. Godard, et C. Mesgouez. « Odontologie et vols spatiaux de longue durée ». *Clinic* 40, n° 9 (2019): 577-87.
- Breteuil, E. de. *Exposition abrégée du système du monde*. Ed. Alexis Clairaut, 1759. <http://www.bibnum.education.fr/physique/mecanique/exposition-abregee-du-systeme-du-monde>.
- Cantayre, G., et K. Nasr. « Sept caméras d'empreintes optiques intra-orales au banc d'essai ». *Le fil dentaire*, n° 135 (2018): 26-32.
- Centre national d'innovation et de formation des prothésistes dentaires. « Guide de la CFAO dentaire : CAO », 2009. <http://www.cnifpd.fr/guidecfao/cao.html>.
- . « Guide de la CFAO dentaire : CFAO et standards numériques », 2009. <http://www.cnifpd.fr/guidecfao/standards.html>.
- . « Guide de la CFAO dentaire : fabrication », 2009. <http://www.cnifpd.fr/guidecfao/fabrication.html>.
- . « Guide de la CFAO dentaire : numérisation 3D », 2009. <http://www.cnifpd.fr/guidecfao/numerisation.html>.
- Cheng, X., X. Xu, J. Chen, X. Zhou, L. Cheng, M. Li, J. Li, R. Wang, W. Jia, et Y. Li. « Effects of simulated microgravity on *Streptococcus mutans* physiology and biofilm structure ». *FEMS microbiology letters* 359, n° 1 (2014): 94-101. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12573>.
- Coisne, J., J. Grandsire, et A. Wilson. « European astronaut selection », 2008.
- Collins, F. « Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport de la télémédecine bucco-dentaire ». Thèse d'exercice, Université Paul Sabatier, 2018. <http://thesesante.ups-tlse.fr/2168/1/2018TOU33021.pdf>.

- Décret n° 2010-1229 du 19 octobre 2010 relatif à la télémédecine, 2010-1229 § (2010).
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022932449&categorieLien=id>.
- Drake, B., et K. Watts. « Human exploration of Mars design reference architecture 5.0 ». National aeronautics and space administration, 2014.
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NASA-SP-2009-566-ADD2.pdf>.
- Emanuelli, M. « Evolution of NASA Medical Kits : From Mercury to ISS », 2014.
<http://www.spacesafetymagazine.com/spaceflight/space-medicine/evolution-medical-kits-mercury-iss/>.
- Esterle, A. « Pesanteur et impesanteur : une introduction à la microgravité ». *Astronomie*, n° 100 (1986): 383-96.
- European space agency. « Astronaut training ». Esa. Consulté le 26 mai 2020.
https://www.esa.int/About_Us/EAC/Training.
- . « Diet tracker in space », 2017.
https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Astronauts/Diet_tracker_in_space.
- . « Frequently asked questions on ESA astronauts ». Esa. Consulté le 26 mai 2020.
http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Astronauts/Frequently_asked_questions_ESA_astronauts.
- . « Histoire de l'exploration de Mars ». Esa, 2003.
http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/Histoire_de_l_exploration_de_Mars.
- . « Psychological and medical selection process ». Esa, 2008.
http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/European_Astronaut_Selection/Psychological_and_medical_selection_process.
- . « Robotic exploration of Mars ». Esa, 2019. <https://exploration.esa.int/web/mars/-/56504-missions-to-mars#2000>.
- . « Space food : astronaut nutrition ». Consulté le 26 mai 2020.
https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/Space_food_astronaut_nutrition/offline/download.pdf.
- . « Stressed in Space », 2016 .
https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Stressed_in_space.

- . « The Radiation Showstopper for Mars Exploration », 2019.
https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/The_radiation_showstopper_for_Mars_exploration.
- Gavois, S. « Coloniser Mars : l'ambitieux projet de SpaceX en 15 questions », 2016.
<https://www.nextinpact.com/news/101571-coloniser-mars-ambitieux-projet-spacex-en-15-questions.htm>.
- Hadfield, C. *How to brush your teeth in space*, 2013.
<https://www.youtube.com/watch?v=TU9kffoAQ8U>.
- Häuplik-Meusburger, S., H. Meusburger, et U. Lotzmann. « Emergency dental treatment on way to Mars », 2016. <https://room.eu.com/article/emergency-dental-treatment-on-way-to-mars>.
- Hawkins, R., J. F. Zieglschmid, et B. Lyndon. « Crew health and medical monitoring ». In *Biomedical results of Apollo*, National aeronautics and Space administration. Consulté le 26 mai 2020.
<https://history.nasa.gov/SP-368/s2ch1.htm>.
- Hord, C.W., K.E. Simmons, et L.K. Mclaughlin. « Mariner 9 ultraviolet spectrometer experiment (pressure-altitude measurements on Mars) ». *Icarus*, 1974. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(74\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(74)90044-X).
- Jérôme, B. « Thomas Pesquet : «Je rêve de poser le pied sur Mars» », 2020.
<http://www.leparisien.fr/sciences/thomas-pesquet-je-reve-de-poser-le-pied-sur-mars-29-05-2020-8325972.php>.
- Johnston, R. S., et L. F. Dietlein, éd. *Biomedical results from Skylab*. Washington : Scientific and technical information office, National aeronautics and space administration, 1977.
- Kite-Powell, J. « See How This Printer Works in Zero Gravity on the International Space Station », 2018.
<https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2018/04/12/see-how-this-printer-works-in-zero-gravity-on-the-international-space-station/#279d43261a12>.
- Klouz, H. « La CFAO dentaire : une vision globale », 2018. <https://www.3dcelo.com/la-cfao-dentaire-une-vision-globale/>.
- Lakshmi, et D. Sakthi. « Aviation dentistry ». *Journal of clinical and diagnostic research* 8, n° 3 (2014): 288-90. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2014/7232.4189>.
- Made in space. « Made In Space 3D Printing PPE to Help in the Fight against COVID-19 ». Made In Space, 2020. <https://madeinspace.us/2020/04/08/made-in-space-3d-printing-ppe-to-help-in-the-fight-against-covid-19/>.
- . « Spaceflight Missions ». Consulté le 26 mai 2020. <https://madeinspace.us/about/spaceflight-missions/>.

- Marchand, L. « Objectif Mars : à quand des hommes sur la planète rouge ? », 2019. <https://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/objectif-mars-a-quand-des-hommes-sur-la-planete-rouge-1040097>.
- Marinova, M., C.P. McKay, et H. Hashimoto. « Radiative-convective model of warming Mars with artificial greenhouse gases ». *Journal of geophysical research planet* 110, n° E3 (2005). <https://doi.org/10.1029/2004JE002306>.
- McKay, C. « Is it possible to create a viable atmosphere on Mars? - Learn from Chris McKay, an expert in Geophysics , Atmospheric Science », 2018. https://metafact.io/factcheck_answers/567.
- Michelle, S. « Zero gravity bioprinter: ready for the International Space Station ». *3Dnatives* (blog), 2018. <https://www.3dnatives.com/en/zero-gravity-bioprinter220820184/>.
- Moore, S., et H. MacDougall. « Journey to Mars : physiological effects and operational consequences of long-duration microgravity exposure ». *Journal of cosmology* 12 (2010): 3781-93.
- Musk, E. *Making Humans a Multiplanetary Species*. Vidéo, 2016. https://www.youtube.com/watch?v=H7Uyfqj_TE8.
- National aeronautics and space administration. « Communications with Earth on NASA's Mars exploration program ». Nasa. Consulté le 26 mai 2020. <https://mars.nasa.gov/msl/mission/communications/>.
- . « Ingestible toothpaste ». Nasa. Consulté le 26 mai 2020. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020091883.pdf>.
- Ormston, T. « Time delay between Mars and Earth ». Consulté le 26 mai 2020. <https://blogs.esa.int/mex/2012/08/05/time-delay-between-mars-and-earth/>.
- Pellat, B. « Salive, fluide gingival, fluide oral », 2015.
- Prater, T., N. Werkheiser, F. Ledbetter, D. Timucin, K. Wheeler, et M. Snyder. « 3D printing in zero g technology demonstration mission : complete experimental results and summary of related material modeling efforts ». *The international journal of advanced manufacturing technology* 101, n° 1 (2019): 391-417. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2827-7>.
- Qualitative reasoning group. « Why does the data transfer rate have to drop with distance ? » Consulté le 26 mai 2020. <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/communications/2-why-does-data-transfer-rate-drop-with-distance.html>.
- Rai, B., et J. Kaur. « Periodontal status, salivary immunoglobulin, and microbial counts after short exposure to an isolated environment ». *Journal of oral science* 55, n° 2 (2013): 139-43. <https://doi.org/10.2334/josnusd.55.139>.
- Rothmund, W. « Handheld vs. conventional wall-mounted x-ray units », 2019. <https://www.rdhmag.com/patient-care/article/14068492/handheld-vs-conventional-wallmounted-xray-units>.

- Rousseau, J.-J. *Discours sur les sciences et les arts*. Paris: Flammarion, 2008.
- Roxby, P. « Treating medical emergencies in space ». *BBC News*, 2016, sect. Health.
<https://www.bbc.com/news/health-35254508>.
- Seedhouse, E. « Interplanetary Health Care ». In *Trailblazing Medicine*, 15-37. New York: Springer, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7829-5_2.
- Simpson, A., C. Doarn, et S. Garber. « A brief history of NASA's contributions to telemedicine ». Nasa, 2020. <https://history.nasa.gov/NASAtелеmedicine-briefhistory.pdf>.
- Télémedecine 360. « Le projet E-Dent de télémedecine en Languedoc-Roussillon ». *Télémedecine 360* (blog), 2015. <https://www.telemedecine-360.com/le-projet-e-dent-de-telemedecine-en-languedoc-roussillon/>.
- thomasj83. « Pourquoi Elon Musk ne doit pas envoyer l'Homme sur Mars ». *L'Express*, 2016. https://www.lexpress.fr/actualite/pourquoi-elon-musk-ne-doit-pas-envoyer-l-homme-sur-mars_1837162.html.
- Tran, L. « How NASA will protect astronauts from space radiation at the Moon ». Nasa, 2019. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/how-nasa-protects-astronauts-from-space-radiation-at-moon-mars-solar-cosmic-rays/>.
- Union française pour la santé bucco-dentaire. « L'UFSBD réactualise ses stratégies de prévention ». *Pratique dentaire*, 2013, 19-24.
- Zimmermann, D. « Extracting a tooth should be the last resort in space ». *Dental tribune*, 2013. <https://am.dental-tribune.com/news/interview-extracting-a-tooth-should-be-the-last-resort-in-space/>.

Table des figures

Figure 1 : Modélisation du Système solaire par ordre de proximité au Soleil	5
Figure 2 : Comparaison qualitative et quantitative des atmosphères martien et terrestre	6
Figure 3 : Selfie du robot "Curiosity" à l'étuve de Glen sur Mars, le 11 Octobre 2019.....	8
Figure 4 : Schéma explicatif des deux modèles de trajectoire discutés pour un vol habité vers Mars. 10	
Figure 5 : Schéma explicatif du modèle de transfert entre la Terre et Mars selon Space X.	13
Figure 6 : Cosmonautes de la mission Apollo-Soyouz Test Project ayant collées des étiquettes de vodka sur des tubes de soupe pour trinquer avec leurs collègues américains.	16
Figure 7 : Caisse d'aliments "bonus".	17
Figure 8 : Schéma de l'adaptation d'une couronne périphérique au niveau d'une deuxième prémolaire mandibulaire	27
Figure 9 : Exemple de sept caméras commercialisées par les principaux acteurs du secteur.....	30
Figure 10 : CAO d'une couronne périphérique sur logiciel "Cerec"	31
Figure 11 : Deux sondes du système de trans-illumination I.C. Lercher	33
Figure 12 : Système de radiographie panoramique/CBCT scanner (gauche), et générateur pour radiographie dentaire (droite)	34
Figure 13 : Exemple de système d'assistance photographique "studio" pour un smartphone	36
Figure 14 : Image extraite d'une vidéo de l'astronaute américain Jeff Williams présentant l'appareil photo utilisé sur l'ISS	36
Figure 15 : Processus de recrutement médical et psychologique des spationautes	41
Figure 16 : Contenu du certificat JAR-FCL 3 Classe 2	42
Figure 17 : Répartition des candidats-astronautes en 3 classes de santé bucco-dentaire	44
Figure 18 : L'astronaute de l'ESA et CMO Alexander Gerst s'exerçant sur un mannequin durant sa formation médicale pré-vol.....	47
Figure 19 : Contenu du kit médical des missions Apollo	48
Figure 20 : Contenu du kit dentaire de l'Inflight Medical Support System des missions Skylab.....	49
Figure 21 : Chris Hadfield se brossant les dents sur l'ISS	53
Figure 22 : Examen bucco-dentaire du commandant Pete Conrad par le CMO Joseph Kerwin lors de la mission Skylab 2	54
Figure 23 : Illustration de la Troisième Loi de Newton	55
Figure 24 : Générateur radiologique portatif Kavo NOMAD™ Pro 2.....	56
Figure 25 : Instruction du constructeur sur le positionnement de l'appareil garantissant un maximum de radioprotection	57

Figure 26 : Prise de cliché intra-oral avec système radiographique portable	58
Figure 27 : Peggy Whitson et Jack Fischer communiquant directement de l'ISS avec les panélistes de la National Association of Broadcasters via une technologie de streaming en ultra haute-définition 4K59	
Figure 28 : Unité dentaire portable (détartreur, rotatifs, aspiration et lampe à photopolymériser	61
Figure 29 : L' AMF et son utilisation sur la Station Spatiale Internationale	63
Figure 30 : L'astronaute Charlie Duke se relevant après être tombé sur la Lune, lors de la mission Apollo 16 en 1972	65
Figure 31 : Accident imaginaire au sein d'une station sur Mars, où un membre de l'équipage perd une restauration dentaire	65
Figure 32 : Le membre de l'équipage blessé scannant la zone blessée à l'aide d'une caméra intra-orale	66
Figure 33 : Expert dentaire sur Terre analysant et créant la restauration virtuelle ainsi qu'un guide de positionnement avant de renvoyer les données vers la base sur Mars.....	66
Figure 34 : Astronaute analogue utilisant une caméra intra-orale pour enregistrer la zone affectée lors d'une simulation.....	67

Vu, le Directeur de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie

Docteur Margaux HINET

Professeur Louis MAMAN

Vu, le Président d'Université de Paris

Professeur Christine CLERICI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Louis MAMAN

Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport des technologies numériques

Léonie Maujean. Odontologie spatiale et missions interplanétaires : apport des technologies numériques. 2021. 75 p. : ill. Réf. bibliographiques p. 69-73.

Sous la direction de Mme le Docteur Margaux Hinet

Université de Paris
UFR d'Odontologie - Montrouge
1, rue Maurice Arnoux - 92120 Montrouge