

Prise en charge des pathologies réanimatoires et chirurgicales au cours des futures missions d'exploration spatiale

Management of Critical and Surgical Conditions during Future Space Exploration Missions

M. Komorowski · B. Comet

Reçu le 7 avril 2014 ; accepté le 6 mai 2014
© SRLF et Springer-Verlag France 2014

Résumé La prise en charge des pathologies médicochirurgicales sévères au cours des futures missions d'exploration spatiale constituera un véritable défi. En raison d'innombrables contraintes, toutes les pathologies ne pourront pas accéder à une prise en charge et le système médical devra se focaliser sur les plus fréquentes et les plus sévères. L'objectif de cette étude est de proposer des recommandations afin d'optimiser le kit médical embarqué tout en réduisant le risque vital associé à de telles missions. Par une recherche bibliographique en médecine spatiale et milieux analogues, une liste exhaustive de pathologies attendues a été établie. Leur incidence par mission et leur mortalité moyenne ont été estimées. En croisant ces données avec différentes options de systèmes médicaux, il devient possible de mettre en balance la complexité du kit médical et le risque vital accepté et de déterminer quelles seraient les techniques thérapeutiques les plus essentielles. D'après l'analyse, les pathologies associées au risque vital le plus significatif sont en premier lieu les états septiques graves et les pathologies traumatiques sévères. Au-delà des traitements les plus simples (perfusions, antibiotiques, oxygénothérapie...), il apparaît fondamental de disposer de la capacité d'administrer des dérivés ou des substituts sanguins et de réaliser des actes chirurgicaux. Les résultats permettent également d'exclure certaines pathologies sévères mais estimées exceptionnelles.

Globalement, les résultats obtenus sont tout à fait concordants avec les publications sur le sujet et ont le potentiel d'améliorer les pratiques médicales sur Terre, par exemple en médecine humanitaire, militaire ou en environnement austère.

M. Komorowski (✉)
Département d'anesthésie-réanimation, hôpital Claude-Huriez,
CHRU de Lille, rue Michel-Polonovski,
F-59037 Lille cedex, France
e-mail : Matthieu.komorowski@gmail.com

B. Comet · M. Komorowski (✉)
MEDES, 21, chemin de la Pelude, F-31400 Toulouse, France
e-mail : Matthieu.komorowski@gmail.com

Mots clés Réanimation · Chirurgie · Exploration spatiale · Médecine spatiale · Système médical

Abstract During future space exploration missions, management of severe medical and surgical conditions will represent a challenge. Due to severe limitations in acute care capabilities, the medical system will need to focus only on the most likely and severe conditions. Using a probabilistic approach, the primary objective of this analysis is to offer recommendations for the preparation of crews and onboard medical systems, with the aim of optimizing the medical kit while maintaining the estimated mortality risk within acceptable limits. Based on the analysis of medical literature in space medicine and analogue environments, a list of expected conditions has been established. Their incidence and average mortality in similar populations have been estimated. By balancing medical kits complexity and estimated vital risk, it becomes possible to determine which therapeutic techniques are mandatory. According to the analysis, the conditions associated with the most significant risk are severe sepsis and traumatic injuries. Besides the basic medical procedures (intravenous access, antibiotics, oxygen...), it seems essential to be able to administer blood products or substitutes and perform surgery. The results also provide a list of conditions that could probably be excluded from the medical system due to their poor outcome, complex management and extremely low estimated likelihood. The results globally correspond to the conclusions of previous publications. Like numerous spin-offs of space technologies in the past, this research is useful to increase the level of care on Earth, in particular in harsh and isolated environments.

Keywords Critical care · Surgery · Space exploration · Space medicine · Medical system

Introduction

Des missions spatiales au-delà de l'orbite terrestre basse sont planifiées dans un futur proche. Au cours de ces missions,

qui pourront emporter des équipages de six personnes pour des durées allant jusqu'à trois ans, le risque d'événement médical sévère est significatif, et les équipages ne pourront bénéficier d'aucune aide extérieure en raison des distances considérables en jeu. Les télétransmissions pourront ainsi prendre jusqu'à 20 minutes dans chaque direction, dans le cas d'une mission martienne.

Le maintien de la santé et de la performance des équipages par le biais de soins médicaux est essentiel afin de remplir les objectifs de la mission, qui seront avant tout d'explorer afin de faire progresser la science et nos connaissances sur l'univers. L'histoire a montré qu'au cours des explorations lointaines sur Terre, les problèmes d'adaptation de la physiologie humaine, les maladies et les traumatismes ont été responsables de plus d'échecs de missions que les facteurs techniques ou environnementaux [1]. La préparation d'une telle mission implique pour les ingénieurs et médecins d'apporter une réponse à de nombreuses problématiques, qui incluent un niveau d'autonomie médical sans précédent dans l'histoire des vols spatiaux. Parce qu'une évacuation rapide vers la Terre sera impossible, la capacité à prendre en charge les problèmes médicaux sur place sera fondamentale pour le succès de la mission [2]. De multiples contraintes viendront cependant compliquer la pratique médicale et rendront impossible le traitement de l'ensemble de la pathologie humaine. L'équipage devra donc faire usage d'improvisation et accepter un certain degré de risque, y compris vital.

L'objectif de cette étude bibliographique est de proposer des recommandations sur la préparation des équipages et des systèmes médicaux embarqués, avec pour objectif d'optimiser le kit médical tout en réduisant le risque de décès par maladie ou traumatisme. Le principe de l'analyse est de mettre en balance la complexité du kit médical et le risque vital accepté afin de déterminer quelles seraient les techniques thérapeutiques les plus essentielles.

Après une explication sur les phénomènes à l'origine de la genèse d'atteintes médicales spécifiques au milieu spatial, une liste de 44 pathologies et syndromes susceptibles de survenir au cours d'une mission d'exploration spatiale (MES) est proposée, établie à partir d'une recherche bibliographique en médecine spatiale et en milieux analogues (médecine militaire, polaire, d'expédition, humanitaire...). Les contraintes à la pratique des techniques d'anesthésie et de réanimation sont détaillées, prérequis à la discussion du choix des pathologies accessibles à une prise en charge et des techniques diagnostiques et thérapeutiques essentielles. Des propositions sont données sur des pistes de recherche qui pourraient permettre de répondre à certaines des problématiques majeures qui restent en suspens.

Définition d'une mission d'exploration spatiale

La dénomination de MES fait référence à tout vol spatial au-delà de l'orbite terrestre basse, soit plus de 2000 km de la surface. Par contraste, la station spatiale internationale (ISS) orbite actuellement notre planète à une altitude moyenne de 300 à 400 km.

Au moins 76 profils officiels de missions martiennes issus des agences spatiales et de divers bureaux d'études ont été rendus publics entre 1952 et 2013. Wernher Von Braun, dans son « *Marsprojekt* », envisageait par exemple une mission comprenant pas moins de 1000 lancements, une flotte de dix fusées en partance pour Mars, ainsi qu'un équipage de 70 astronautes.

La réalité sera vraisemblablement bien plus modeste. Le programme américain Constellation, qui devait voir le retour des vols habités lunaires vers 2020, puis martiens vers 2035 a été abandonné en 2010, mais offre néanmoins des informations très détaillées sur les vols potentiels. Le profil de la mission martienne proposé comprenait un équipage de six membres, et devait durer au total 900 jours (soit 2,6 années). Les missions lunaires devaient emporter quatre personnes pour des missions de 7 (*Lunar Sortie*) ou de 180 (*Lunar Outpost*) jours à la surface de la Lune (Fig. 1). Toujours en 2010 et en remplacement du programme Constellation, le président Obama annonçait un nouvel objectif pour le programme spatial américain : la mission vers un astéroïde géocroiseur (*Near-Earth Asteroid*) à l'horizon 2025. Une telle mission emporterait quatre astronautes pour un an environ. En parallèle des agences gouvernementales, de nombreuses compagnies privées ont annoncé, à des coûts souvent bien inférieurs, des vols vers la Lune ou Mars.

Quelle que soit la mission, les conditions auxquelles seront soumis les équipages pourront être à l'origine de l'apparition de pathologies spécifiques au milieu spatial,



Fig. 1 Concept de 1992 d'un accident au cours d'une mission d'exploration lunaire. Ici, un ingénieur a chuté d'une falaise en installant une antenne et s'est fracturé le fémur droit. Crédit : NASA

qui viendront s'ajouter aux risques médicaux classiques qui les menaceront également.

Éléments de pathogenèse spatiale

L'environnement extrême que constitue l'espace est à l'origine d'une série de troubles spécifiques et pour certains sévères. Parmi ceux-ci, les plus préoccupants comprennent l'exposition aux radiations ionisantes, la dégradation de l'état physiologique en apesanteur et les troubles psychologiques. Le Tableau 1 compare l'environnement spatial à

divers milieux analogues terrestres, et démontre le caractère extrême des conditions auxquelles les équipages seront soumis.

Le problème de l'exposition aux radiations (en particulier lors d'éruptions solaires) constitue l'un des risques majeurs du vol spatial au-delà de l'orbite terrestre basse [3]. Seuls des progrès très significatifs de l'ingénierie des systèmes spatiaux et de la prise en charge médicale permettront aux astronautes de voyager vers d'autres planètes avec un degré de risque acceptable [4]. Trois sources principales de radiations ionisantes menacent les astronautes dans l'espace : rayonnement cosmique, éruptions solaires (*solar particle event*) et

Tableau 1 Données comparatives du milieu spatial et de milieux analogues en termes de degré d'isolation, des risques environnementaux et de pathologies attendues. *L'altitude peut excéder 4 000 m en Antarctique. †Le dysbarisme englobe la maladie de décompression, l'embolie gazeuse artérielle et le barotraumatisme. ‡Un environnement clos implique un risque vital immédiat en cas de perte d'étanchéité, de feu, de relargage de gaz ou de substances toxiques. §Risque des plongées en saturation

Environnement	Spatial (station, Lune, Mars)	Polaire	Haute altitude	Expédition (jungle, désert...)	Sous-marin, plongée en saturation
Degré d'isolation					
Durée d'isolement	Jusqu'à 30 mois	Jusqu'à 13 mois	Jusqu'à plusieurs semaines	Jusqu'à plusieurs semaines	Jusqu'à plusieurs mois
Possibilité d'évacuation en urgence	Pas au-delà de l'orbite terrestre basse	Pas en hiver	Difficile ou impossible	Difficile ou impossible	Difficile ou impossible
Communication	Délai : 1s (Lune), 3-20 min (Mars)	Possible en général	Possible en général	Possible en général	Possible en général
Risques environnementaux, effectifs ou potentiels					
Températures extrêmes	+++ (potentiel, -150 à +120 °C)	+++ (effectif, mini -90°C)	+++ (effectif)	++ (effectif)	+ (potentiel)
Hypoxie	+++ (potentiel)	+/- *	+++ (effectif)	+/-	-
Dysbarisme†	+++ (potentiel)	-	-	-	+++ (potentiel)
Radiations	+++ (effectif)	+	+	+/-	-
Milieu clos‡	+++ (potentiel)	++ (potentiel)	-	-	+++ (potentiel)
Pathologies attendues					
Traumatismes	+	+	+++	+++	+
Infections	+	+	+	+++	+
Troubles psychologiques	+++	++	+	+	++
Perte de capacité aérobie	++	+	+++	+/-	+
Troubles nutritionnels	+++	++	+	+	++
Pathologies et risques spécifiques	Apesanteur, intolérance orthostatique, météorites, ostéoporose, poussières planétaires	Nuit polaire, vie sauvage	Mal aigu des montagnes, œdème cérébral et pulmonaire de haute altitude	Vie sauvage	Syndrome nerveux des hautes pressions§, ostéonécrose dysbarique§

radiations piégées dans les ceintures de Van Allen [5]. Il a été estimé que des individus participant à une mission de 2,7 années vers Mars seraient exposés en l'absence de moyens de protection efficaces à 2,26 Sv durant le voyage, ce qui correspond à 280 fois la dose reçue sur Terre durant la même période, ou à 113 000 radiographies de thorax. Il a été estimé que cette dose serait suffisante pour donner chez 10 % des hommes et 17 % des femmes âgés de 25 à 34 ans un cancer létal dans leur vie [6]. Le risque d'infertilité et de cataracte est également augmenté. Les radiations n'affecteront pas uniquement les organismes humains. Il existe un risque potentiel, pour l'instant non confirmé, de mutations et de modifications du pouvoir pathogène des microorganismes dans l'espace, induites par les radiations ionisantes [7]. Il a été démontré que l'isolation et le stress chronique induisaient un état d'immunodépression. Des altérations cellulaires fonctionnelles mais également quantitatives (lymphopénie) ont été mesurées [7]. Les syndromes infectieux sont fréquents au cours des vols spatiaux, touchant par exemple 50-60 % des astronautes du programme Apollo [7]. L'atteinte du système immunitaire pourrait également encore accroître le risque néoplasique.

La disparition de la gravité entraîne une modification du fonctionnement de la plupart des systèmes physiologiques. L'effet de l'apesanteur sur le système cardiovasculaire aboutit à une désadaptation cardiovasculaire avec hypovolémie relative [8]. Une intolérance orthostatique est observée chez plus de 80 % des astronautes au retour à la gravité après un vol prolongé [9]. Toutes ces modifications aboutiraient à amplifier une mauvaise tolérance hémodynamique à un phénomène aigu surajouté tel qu'un sepsis, une hémorragie, une sédation ou une ventilation mécanique.

Lors des sorties extravéhiculaires (*extra-vehicular activity* ou EVA), les astronautes sont menacés par une pathologie spécifique au milieu spatial, la maladie de décompression hypobare. Alors que les environnements des véhicules spatiaux actuels sont normobares et normoxiques, la pression atmosphérique à l'intérieur des combinaisons est bien plus basse : entre 0,3 et 0,4 atmosphère [10]. Une atmosphère d'oxygène pur permet de prévenir l'hypoxémie et un protocole de dénitrogénéation diminue le risque de maladie de décompression. Les ingénieurs ont pour l'instant échoué à concevoir une combinaison à la fois souple et suffisamment pressurisée afin de protéger les astronautes de cette affection. La pression minimale dans la combinaison qui élimine théoriquement le risque de maladie de décompression est de 615 hPa (permettant un *Tissue Ratio* de 1,3) [11]. Les études en caisson hypobare reproduisant le profil pressurisé rapportent une incidence théorique très élevée (50 à 80 % de bulles veineuses détectées et 10 à 20 % de symptômes du type « *bends* » ou douleurs articulaires) [12]. Considérant que plus de 350 EVA ont été conduites depuis 1965, nous devrions nous attendre à au moins une trentaine

de cas. Or des symptômes de maladie de décompression n'ont été qu'exceptionnellement rapportés. Alors qu'il semble que l'environnement d'apesanteur protège effectivement contre l'apparition de maladie de décompression (diminution de la genèse de micronucléi, lenteur des mouvements en combinaison), une explication évoquée par certains spécialistes est celle d'une sous-déclaration [11]. Il est intéressant de noter que tous les astronautes qui participent actuellement à une EVA prennent 600 mg d'aspirine à visée préventive [13].

Au cours du vol spatial se produit une déminéralisation osseuse continue, dont l'importance est proportionnelle à la durée du vol. Malgré les moyens de prévention actuels (exercice physique en particulier), la densité minérale osseuse (DMO) accuse une perte de 1 % par mois en moyenne, qui atteint 1,7 % par mois sur les structures osseuses porteuses, telles que le col fémoral et le bassin [8]. Une augmentation du risque fracturaire est suggérée à partir de 15 % de perte de DMO [14]. Le potentiel de cicatrisation osseuse dans l'espace est inconnu, mais il a été démontré qu'elle était affectée par l'apesanteur, où il a été observé une diminution de l'angiogenèse et de la croissance calleuse [3]. La prescription de biphosphonates a été testée sur les astronautes américains [8].

Le problème représenté par le maintien d'un équilibre nutritionnel satisfaisant et la prévention des carences en macro- et micronutriments est complexe. La masse représentée par l'eau et les aliments qui seraient consommés par un équipage de six personnes lors d'une mission sur Mars est estimée à 30 tonnes [15]. Seule l'utilisation de systèmes de recyclage en boucle fermée permettrait de résoudre cette problématique. Ces technologies sont regroupées sous l'acronyme CELSS pour *Closed Ecological Life Support System*. Sur l'ISS, le *Water Recovery System* permet depuis quelques années de recycler 93 % de l'eau consommée et ainsi d'économiser près de 7 000 litres d'eau par an. Dans l'optique d'une mission martienne, le projet MELISSA de l'Agence Spatiale Européenne a pour objectif de recycler les déchets d'origine humaine tout en produisant de l'oxygène et des aliments [16]. Des cultures de riz, oignon, tomate, soja, pomme de terre, laitue, épinards, blé et spiruline (algue riche en protéines) ont ainsi été expérimentées. D'autres ont proposé la culture de vers à soie comme source protéique [17].

Sur le plan psychologique, l'isolement et le confinement peuvent conduire à l'apparition de pathologies mentales (dépression, anxiété, agressivité, déclin cognitif, perte d'engagement) et de troubles du sommeil [8]. De tels problèmes ont été fréquemment rapportés et ont accéléré dans le passé l'abandon de missions russes [18]. Le compte rendu publié par Valentin Lebedev de son vol de sept mois à bord de la station Salyut 7 (*Diary of a cosmonaut: 211 days in space*) est particulièrement éloquent.

L'effet sur la santé de l'exposition aux poussières planétaires est inconnu, et des préoccupations sont apparues à la

suite de symptômes d'irritation cutanée et des voies aériennes rapportés par les astronautes des missions Apollo [19].

Le paragraphe suivant récapitule quelles sont les pathologies auxquelles il faut se préparer, à partir notamment de l'analyse des événements médicaux rencontrés dans l'histoire du vol spatial habité.

Pathologies attendues et mortalité estimée

Depuis 1961, plus de 540 personnes ont volé dans l'espace, totalisant 78 personnes-années de présence cumulée. De nombreux événements médicaux, bénins ou plus critiques, ont émaillé ces vols. On doit déplorer à ce jour 21 décès survenus durant le vol spatial ou l'entraînement (Soyuz 1, Apollo 1, Soyuz 11, Challenger et Columbia), dans tous les cas faisant suite à des défaillances de véhicule et non pas à une pathologie médicale.

Dans l'histoire spatiale soviétique, certains événements médicaux ont conduit à l'abandon de la mission et à l'évacuation de stations à trois reprises, dans les années 1970 et 1980. Il s'agissait d'un sepsis sur prostatite, d'arythmie et de céphalées réfractaires. Certains rappellent que des facteurs comportementaux et psychologiques ont joué un rôle important dans la décision d'évacuation [18]. D'autres événements médicaux sévères sont survenus. On peut citer par exemple des cas de maladie de décompression et d'arythmie au cours de sorties extravéhiculaires sur la Lune (Apollo 11 et 15, respectivement) et trois cas de syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA) par exposition à un comburant dans une capsule Apollo, le peroxyde d'azote, au cours de la première mission conjointe entre Américains et Soviétiques [20].

Il n'y a jamais eu de mesures réanimatoires, anesthésiques ni de chirurgie sur des êtres humains dans l'espace. Il faut voir dans la rareté des événements médicaux graves avant tout un succès des procédures de sélection des astronautes, particulièrement drastiques.

Tous les astronautes font l'objet d'un suivi médical rapproché tout au long de leur carrière, qui se poursuit après leur retraite. À la NASA, toutes les données ainsi recueillies sont incorporées dans une étude longitudinale de cohorte appelée LSAH pour *Longitudinal Study of Astronaut Health*. En utilisant comme population contrôle les employés du *Johnson Space Center*, plusieurs études ont analysé les facteurs de mortalité des astronautes. Les conclusions rapportent un sur-risque de mortalité par accident catastrophique, et une tendance au sur-risque de mortalité par cancer par rapport au groupe contrôle, qui n'atteint pas la significativité [21]. La mortalité par pathologie coronaire est 53 % inférieure au chiffre attendu pour la classe d'âge [21].

En colligeant les pathologies observées dans l'histoire du vol spatial et analyse de la littérature en milieux analogues (Tableau 1), il est possible d'établir une liste de 44 patho-

logies critiques attendues (Tableau 2) [14,22,23]. La quantification du risque impose de connaître l'incidence et la mortalité moyennes estimées de ces pathologies. Même s'il ne s'agit que d'approximations, ces valeurs sont fondamentales pour pouvoir apporter des arguments chiffrés pour améliorer la préparation des équipages et des systèmes médicaux devant être embarqués.

Par l'analyse d'études épidémiologiques en médecine spatiale et dans les milieux analogues, mais également dans la population générale (classe d'âge similaire des 25–54 ans dans les deux sexes), il est possible d'estimer le risque de survenue de la plupart de ces événements médicaux ainsi que leur mortalité moyenne sur Terre malgré une prise en charge médicale adéquate. La liste s'applique surtout à l'environnement martien, qui constitue pour l'instant la frontière ultime. Le risque de certaines pathologies serait différent dans d'autres environnements. Par exemple, le risque traumatique serait plus faible sur la Lune (1/8 G) que sur Mars (1/3 G). La mortalité de certaines pathologies bénignes est inconnue ou mal renseignée, et a été évaluée à 0,1 ou 0,01 % dans l'analyse.

Même si le risque global de décès suite à une défaillance du véhicule ou d'une pathologie médicale au cours d'une MES est inconnu, des objectifs de fiabilité sont utilisés par les agences spatiales, notamment en raison des implications de tels chiffres sur la conception des vaisseaux spatiaux habités et des équipements. Au niveau européen, les objectifs suivants ont été avancés [14] :

- risque de décès toutes causes confondues (y compris perte du véhicule) à maintenir sous les 2 % par an et par personne ;
- risque de décès de cause médicale (maladie ou traumatisme) à maintenir sous les 0,24 % par an, ce qui correspond à la mortalité individuelle en pays occidental dans la classe d'âge 25-54 ans [22].

Afin de classer les pathologies, un indice de gravité est proposé, calculé en multipliant l'incidence individuelle par mission et la mortalité estimée. Cet indice représente ainsi la mortalité imputable à une pathologie, pour une personne au cours d'une mission. Notons qu'additionner tous les indices de gravité surestimerait bien sûr la mortalité totale individuelle par mission, puisque de nombreuses pathologies sont interdépendantes et souvent simultanées (par exemple sepsis et pneumopathie, choc hémorragique et polytraumatisme...).

Contraintes à la pratique de l'anesthésie-réanimation au cours des missions d'exploration spatiale

Sur Terre, les conditions idéales pour la pratique de la médecine sont celles d'un environnement stable et familier et

Tableau 2 Liste des 44 pathologies médicochirurgicales et syndromes sévères susceptibles de survenir durant une mission d'exploration sur Mars, incidence individuelle estimée par mission et mortalité estimée, classés par indice de gravité. Cet indice est obtenu en multipliant incidence individuelle par mission et mortalité estimée. La référence IMM correspond aux données du projet *Integrated Medical Model*, fournies gracieusement par le Dr Eric Kertsman, membre de l'équipe *Exploration Medical Capability* au sein du *Human Research Program* de la NASA (données non publiées).

	Incidence estimée (événements par personne et par mission)	Mortalité estimée de chaque événement (%)	Indice de gravité
Sepsis et choc septique	0,0312 [24]	30 [25]	0,936
Choc hémorragique	0,01092 [26]	19,5 [27]	0,213
Polytraumatisme	0,01092 [26]	17,1 [27]	0,187
Traumatisme abdominal et pelvien	0,0161 [14]	10 [28]	0,161
Traumatisme thoracique	0,0114 [14]	9,3 [27]	0,134
Pancréatite aiguë	0,0107 [22]	12,5 [29]	0,134
SDRA	0,0039 [30]	30 [31]	0,117
Exposition aux radiations ionisantes	0,0341 [14]	3,4 [32]	0,116
Hémorragie digestive	0,011 [33]	10,1 [34]	0,111
Lithiase urinaire	0,0984 [35]	1 [35]	0,098
Hémorragie méningée	0,0019 [36]	50 [36]	0,095
AVC	0,0076 [37]	25 [38]	0,090
Arrêt cardiorespiratoire	0,001 [39]	80 [39]	0,080
Traumatisme médullaire	0,0079 [22]	10 [40]	0,079
Traumatisme crânien	0,0706 [22]	1,07 [23]	0,076
Syndrome compartimental abdominal	0,0015 [26]	50 [41]	0,075
Fracture de membre	0,1404 [22]	0,5 [42]	0,070
Infections bronchopulmonaires	0,1039 [22]	0,64 [23]	0,066
Anaphylaxie	0,0284 [14]	2 [43]	0,057
Maladie de décompression	0,0937 [IMM]	0,57 [44]	0,053
Exposition à un environnement toxique	0,0474 [14]	1 [45]	0,047
Insuffisance rénale aiguë	0,0031 [46]	15 [46]	0,047
Intolérance orthostatique au retour à gravité	3,32 [47]	0,01 (?)	0,033
Coup de chaleur	0,0031 [48]	10 [48]	0,031
Infections intra-abdominales	0,0616 [14]	0,5 [49]	0,031
Embolie pulmonaire	0,0035 [50]	7,25 [50]	0,025
Infarctus du myocarde	0,00624 [39]	3,4 [39]	0,021
Cellulite et érysipèle	0,039 [IMM]	0,5 [51]	0,020
Ischémie aiguë des membres	0,0009 [14]	15 [52]	0,014
Hypothermie	0,001 [53]	12 [53]	0,012
Luxation et entorse	1,104 [22]	0,01 (?)	0,011
État de mal épileptique	0,00066 [54]	15,6 [55]	0,010
Méningite et encéphalite	0,00084 [22]	11 [56]	0,009
Asthme aigu	0,018 [57]	0,4 [23]	0,007
Brûlures	0,0016 [58]	3,5 [58]	0,006
Corps étranger respiratoire	0,0082 [IMM]	0,5 [59]	0,004
Pathologie oculaire	0,3789 [14]	0,01 (?)	0,004
Ulcère gastroduodénal	0,00033 [60]	10 [60]	0,003
Pathologie dentaire	0,156 [22]	0,01 (?)	0,002
Décompensation cardiaque gauche	0,00007 [IMM]	22 [61]	0,002
Insuffisance hépatocellulaire	1,60.10 ⁻⁰⁵ [62]	68 [62]	0,001
Intoxication médicamenteuse	0,0054 [IMM]	0,1 (?)	0,001
Hémoptysie	0,00002 [63]	6,5 [63]	0
Torsion testiculaire	0,0004 [64]	0,01 (?)	0

reposent sur la disponibilité de moyens lourds et d'une expertise pluridisciplinaire. Les conditions exceptionnelles d'une MES viendront bouleverser ces prérequis et d'innombrables contraintes compliqueront les soins médicaux. Ces facteurs sont résumés dans le Tableau 3 et les paragraphes suivants insistent sur certains points.

Limites en communication et autonomie

Actuellement, en cas de problème médical sérieux à bord de l'ISS, il existe l'option d'évacuer la station afin de rejoindre en 6 à 12 heures environ des installations médicales sur Terre [20]. Notons que les moyens actuels ne permettraient pas de pratiquer des mesures réanimatoires complexes ni de ramener sur Terre un astronaute intubé et ventilé, en raison de l'exiguïté du Soyuz et de la nécessité de porter une combinaison pressurisée.

Une évacuation vers la Terre pourrait prendre de quatre à six jours au cours d'une mission lunaire et jusqu'à neuf mois dans le cas d'une mission sur Mars. Les équipages fonctionneront donc en autonomie et devront être en mesure de prendre en charge n'importe quelle défaillance technique ou pathologie médicale.

Pour les missions lunaires, les latences de communications restent réduites (de l'ordre d'une seconde dans chaque direction) et permettent un recours à la télé-médecine presque en temps réel. Pour les missions plus lointaines, les distances interdiront toute communication directe. Les délais atteindront 100 secondes pour une mission vers un astéroïde géo-

croiseur (à une distance de 30 millions de km) et s'échelonnent de 5 à 20 minutes dans chaque direction pour une mission sur Mars. Des propositions d'assistance par vidéos intermittentes ont été publiées pour des scénarios chirurgicaux [65].

Profil du médecin de bord

Certains designs de missions ne comportent pas de médecin à bord, se basant sur le rationnel qu'un ingénieur, un pilote ou un géologue seraient plus utiles, que les pathologies bénignes ne nécessiteront pas de compétences médicales poussées et que le pronostic des pathologies critiques sera catastrophique et peu modifié par la présence d'un médecin.

La plupart des astronautes et experts en médecine spatiale ne sont pas de cet avis, et reconnaissent que la présence d'un médecin disposant d'une large palette de compétences sera fondamentale [4,65-67]. Le profil recherché serait celui d'un spécialiste en médecine spatiale et réanimation ou médecine d'urgence, avec des compétences optionnelles en chirurgie, médecine d'expédition, médecine interne, psychiatrie, gynécologie et chirurgie dentaire [67]. L'astronaute médecin passera le plus clair de son temps à des tâches non médicales qu'il devra être totalement capable d'exécuter [67].

Tous insistent sur la présence nécessaire d'un second membre disposant d'une formation paramédicale avancée (correspondant au « *crew medical officer* » de l'ISS), afin d'offrir un minimum de redondance dans les compétences [67].

Tableau 3 Contraintes à la pratique de l'anesthésie-réanimation dans l'espace [2,24]

Contraintes physiologiques	Dégradation de l'état physiologique induite par l'environnement spatial (mal de l'espace, fonte musculaire, ostéoporose, hypotension orthostatique au retour à la gravité, perte de capacité aérobie...) Mauvaise réponse hémodynamique attendue à l'hypovolémie absolue ou relative, à la sédation, à l'anesthésie ou à la ventilation mécanique Modifications pharmacodynamiques et pharmacocinétiques Possible altération de la cicatrisation
Contraintes techniques	Isolation et impossibilité d'évacuation en urgence Délais de communication Immobilisation du patient, de l'opérateur et de l'équipement Ressources médicales limitées en équipements et consommables (masse, volume, puissance) Limitation de choix et volume de solutés de perfusion Nécessité d'un système de perfusion en apesanteur avec élimination des bulles Altération de la stabilité des médicaments Risque de contamination de l'environnement fermé de l'habitat par des gaz, liquides ou substances biologiques Absence de dérivés ou substituts sanguins Gestion des déchets de soins
Contraintes humaines	Entraînement et expérience limitée de l'équipage (surtout si médecin atteint) Maintien des compétences durant la mission Stress psychologique

Les compétences suivantes constitueront le strict minimum : réanimation médicale et traumatologique, sédation, analgésie et anesthésie, intubation, trachéotomie, drainage thoracique, accès veineux périphérique et central, stimulation cardiaque, drainage péricardique, traitement d'un saignement extériorisé, traitement des plaies, chirurgie mineure, réduction de fractures et luxations, compétences psychiatriques [4]. Il sera essentiel qu'il dispose d'une solide compétence en imagerie médicale, en particulier en échographie diagnostique et en procédures échoguidées. L'échographie est la seule technologie d'imagerie disponible sur l'ISS, et restera vraisemblablement la technique principale dans le futur [4].

Immobilisation du patient, de l'opérateur et du matériel

En apesanteur, le patient, l'opérateur ainsi que tous les équipements doivent être immobilisés. Par exemple, l'utilisation d'une hotte stérile chirurgicale disposant d'un flux laminaire et d'instruments aimantés a été suggérée [68]. Diverses techniques adaptées de massage cardiaque externe ont été évaluées [69].

Limitations en équipements

De nombreux équipements et thérapeutiques ne seront pas disponibles à bord, en raison des limites drastiques en termes de masse et volume de stockage dans les vaisseaux et habitats. Le kit médical pour une mission de type *Lunar Sortie* (sept jours à la surface lunaire) pèserait quelques kilogrammes, pour un volume de 3 litres environ ! À titre d'indication, l'ensemble du matériel médical américain embarqué sur l'ISS, solutés de remplissage compris, pèse 31,2 kg, et mesure 133 litres [13]. Il comporte pas moins de dix éléments, comme un défibrillateur, un brancard pliable (*Crew Medical Restraint System*) et divers sacs (*ambulatory medical, advanced life support, respiratory support, airway*, etc.) (Fig. 2). Le Tableau 4 récapitule le matériel – succinct – disponible pour l'anesthésie à bord, qui permettra au lecteur d'appréhender la problématique que poserait une réanimation prolongée dans l'ISS. Le respirateur actuel est simple et robuste (LSP Autovent 2000[®]), permettant uniquement une ventilation à volume contrôlé en oxygène pur, sans pression télé-expiratoire positive (PEP). Le modèle choisi pour une mission d'exploration devra proposer des modes ventilatoires modernes et être capable de fonctionner en cas de pénurie d'oxygène ou d'électricité. L'ensemble du kit médical pourra s'inspirer de travaux développés en médecine militaire, comme par exemple du système Morphée de l'armée de l'air française, utilisé pour les rapatriements de soldats en état critique [70].

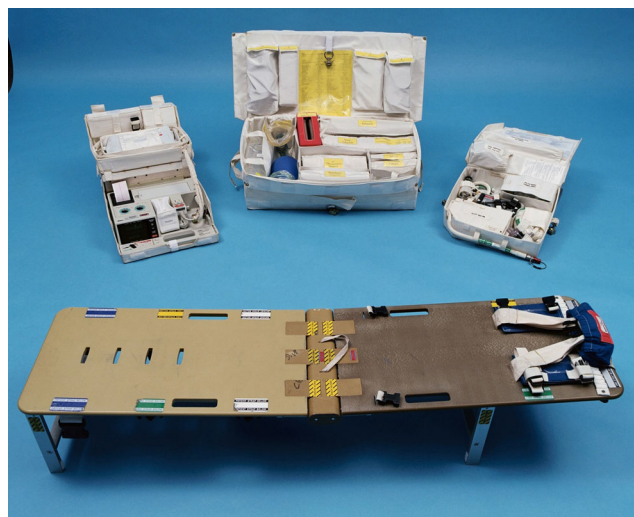


Fig. 2 Éléments du kit médical de l'ISS. En haut, de gauche à droite : défibrillateur, *Advanced Life Support Pack*, *Respiratory Support Pack* ; et en bas : *Crew Medical Restraint System* (système d'immobilisation pliant). Crédit : NASA

Tableau 4 Matériel d'anesthésie actuellement disponible à bord de la Station Spatiale Internationale. PEP : pression télé-expiratoire positive

Catégorie	Équipement
Monitoring	Saturomètre, brassard à tension, stéthoscope
Perfusion	Kit de perfusion intraveineuse avec pompe, sérum salé (4 L disponibles)
Médicaments	Atropine, adrénaline, morphine, codéine, péthidine, diazépam, halopéridol, naloxone, flumazénil
Voies aériennes	Ballon et valve d'Ambu [®] , masque facial, canule nasotrachéale et orotrachéale, laryngoscope pédiatrique et lame Macintosh 3, sonde d'intubation 7 et 8 mm, masque laryngé d'intubation (Fastrach [®]), canule de trachéotomie, ventilateur pneumatique LSP Autovent 2000 [®] (oxygène pur, ventilation à volume contrôlé sans PEP).

Risque incendiaire et explosif

Le relargage d'oxygène à partir d'un masque ou d'un respirateur dans l'habitat posera un risque évident explosif et incendiaire [71]. Un tel risque existe à partir d'une concentration d'oxygène de 24 % dans l'atmosphère, qui pourrait être atteinte en 3 heures seulement avec un débit d'oxygène de 10 L/min dans un environnement clos de 70 m³. Le destin

tragique des trois astronautes d’Apollo 1 nous rappelle la réalité de cette problématique [19].

Drogues vasoactives

L’apesanteur entraîne une diminution de la sensibilité des récepteurs alpha-adrénergiques associée à une augmentation de la sensibilité des récepteurs bêta-adrénergiques [72]. L’utilisation des agents bêta-agonistes et bêta-antagonistes devra donc être prudente et titrée. Il n’y a pas d’argument pour contre-indiquer l’utilisation des alpha-1 agonistes (phényléphrine, noradrénaline, adrénaline), à des doses possiblement supérieures [72].

Solutés de remplissage

La quantité de solutés actuellement disponible sur l’ISS est très limitée (moins de 5 litres) [2]. À l’avenir, un système de génération de solutés de perfusion intraveineuse à partir d’eau de boisson sera vraisemblablement disponible à bord (expérience IV-GEN, actuellement en essai à bord de l’ISS).

Élimination des bulles

Les gaz et les liquides ne se séparant pas en microgravité (voir par exemple les expériences de l’astronaute Don Pettit sur l’ISS), il sera indispensable d’utiliser un système de perfusion adapté à l’apesanteur, probablement fondé sur une pompe péristaltique avec élimination des bulles [71].

Motilité intestinale

Les études sur la motilité gastro-intestinale et la vitesse de vidange gastrique dans l’espace confirment une altération significative, au moins durant les 72 premières heures d’un vol [20]. Une induction de type séquence rapide serait probablement systématique [73].

Curares

L’utilisation de curares dépolarisants (succinylcholine) est déconseillée après exposition prolongée à la microgravité en raison du risque d’hyperkaliémie consécutif aux modifications de la jonction neuromusculaire induites par l’apesanteur [71]. Les curares non dépolarisants restent utilisables.

Stabilité des médicaments

Dans l’espace, les radiations ionisantes peuvent altérer la stabilité et la qualité des médicaments [74]. Un conditionnement protecteur spécifique devra être proposé.

Dérivés ou substituts sanguins

Les durées de conservation des dérivés sanguins sont pour l’instant incompatibles avec une MES. Plusieurs options sont discutées ci-après. En raison de toutes ces contraintes, il sera impossible d’espérer traiter toutes les pathologies connues et le système médical devra se focaliser sur une sélection d’items parmi la liste établie. La question du choix des pathologies accessibles à une thérapeutique est cruciale pour la préparation des systèmes médicaux et des équipages.

Choix des pathologies accessibles à une prise en charge

Pour la suite de l’argumentation, il est fondamental de raisonner en termes de complexité des soins médicaux. De manière artificielle, on établit trois niveaux croissants de moyens diagnostiques, thérapeutiques et humains (Tableau 5). Le niveau 1 correspond à ce qui est actuellement disponible sur l’ISS, où toute pathologie sérieuse requiert une évacuation. Un *crew medical officer* (CMO) dispose d’un entraînement de type infirmier spécialisé en médecine d’urgence. Le niveau 3 correspond aux moyens de référence, disponibles sur Terre et le niveau 2 est intermédiaire.

Les pathologies bénignes et fréquentes pourront être traitées sans difficulté (ex : pathologie dentaire, luxations et entorses...). Afin d’améliorer les chances de survie, le système médical devra permettre le traitement des pathologies les plus graves et les plus fréquentes. Les pathologies sérieuses mais rares ne seront pas accessibles à une prise en charge et relèveront d’un traitement sub-optimal, voire dans certains cas palliatif.

Nous choisissons de définir les pathologies graves comme étant celles dont la mortalité estimée dépasse le 50^e percentile de mortalité de toutes les pathologies identifiées (soit 9,65 %) malgré une prise en charge optimale sur Terre. Parmi ces pathologies, les plus fréquentes justifient d’être l’objet de tous les efforts, puisqu’elles participeront fortement à la mortalité attendue totale de cause médicale. Il s’agit du sepsis, des pathologies traumatiques sévères (choc hémorragique, polytraumatisme, traumatisme abdominal et pelvien, traumatisme thoracique et médullaire), puis du SDRA et de l’hémorragie digestive. Ces items représenteront les pathologies à la mortalité résiduelle la plus élevée en dépit de capacités thérapeutiques avancées. Elles constituent probablement les pathologies sur lesquelles la préparation médicale devra se focaliser pour améliorer significativement les chances de survie des astronautes.

Cette approche permet également d’identifier quelles pathologies seront trop rares et au pronostic trop désespéré pour être considérées. Cette catégorie est également décrite par les experts du NASA *Human Research Program* [75].

Tableau 5 Moyens diagnostiques, thérapeutiques et humains correspondant aux trois niveaux proposés de système médical embarqué au cours d'une mission d'exploration spatiale. PO : per os ; SC : sous-cutané ; IM : intramusculaire ; IV : intraveineux

Moyens			
	Diagnostiques	Thérapeutiques	Humains
1	Monitoring Échographie Électrocardiogramme Laboratoire limité : hémocrite, ionogramme bandelette urinaire	Voie veineuse périphérique Médicaments PO/SC/IM/IV Oxygénothérapie Intubation Ventilation mécanique limitée Défibrillation Immobilisation pour fractures Chirurgie mineure (sutures, extraction dentaire)	<i>Crew Medical Officers</i>
2	+ Endoscopie Radiographie Laboratoire complet Surveillance de l'environnement	+ Voie veineuse centrale/cathéter artériel Médicaments IV, thrombolyse Endoscopie, cystoscopie Ventilation mécanique avancée Drainage thoracique Ponction échoguidée Remplissage massif (générateur de solutés) Oxygénothérapie hyperbare Dialyse péritonéale Pansements complexes (brûlures)	Médecin et <i>Crew Medical Officer</i>
3	+ Scanner/IRM Monitoring continu Système d'aide à la décision médicale	+ Chirurgie complexe Dérivés ou substituts sanguins Support réanimatoire prolongé (sédation, curarisation, nutrition...) Autogreffe de cellules souches Stérilisation du matériel chirurgical Systèmes d'aide thérapeutique et chirurgicale	Médecin spécialisé et <i>Crew Medical Officer</i>

Pour eux, certaines pathologies ne sont pas intégrées au système médical si leur probabilité de survenue est très faible, si on peut s'attendre à ce que l'ingénierie les rende improbable (exemple : combinaisons de sortie extravéhiculaire normobares), ou si les limitations en compétences ou en matériel médical rendent impossible leur traitement (exemple : un SDRA avec hypoxémie réfractaire, qui ne pourrait bénéficier des techniques d'oxygénation extracorporelle).

Dans notre analyse, onze pathologies ont une probabilité de survenue faible (dans le cas de Mars, moins d'un événement pour 160 missions !) et une survie mauvaise (plus de 9,65 % de mortalité) malgré une prise en charge optimale sur Terre. Ceci peut justifier de ne pas les intégrer à la réflexion lors de la conception des systèmes médicaux. Il s'agit de l'hémorragie méningée, du syndrome compartimental abdominal, de l'arrêt cardiorespiratoire, du coup de chaleur, de l'ischémie aiguë des membres, de l'ulcère gastroduodénal, de l'état de mal épileptique, de l'hypothermie, de

l'insuffisance hépatocellulaire, de la décompensation cardiaque gauche, de la méningite et de l'encéphalite. De manière intéressante, la recherche sur la question de l'arrêt cardiorespiratoire dans l'espace est assez active et plusieurs méthodes de massage cardiaque ont été proposées [69]. En fonction de contraintes supplémentaires, d'autres pathologies pourraient être exclues afin d'alléger encore le système médical, au prix d'une augmentation du risque vital estimé.

Recommandations pour la recherche en anesthésie-réanimation dans l'espace

L'analyse a permis d'identifier quelles pathologies étaient associées au risque vital le plus important et quelles techniques diagnostiques et thérapeutiques permettraient de limiter ce risque. Globalement, les résultats obtenus sont tout à fait cohérents avec les assertions des spécialistes sur le sujet

concernant les pathologies médicales les plus préoccupantes [9,13,76,77]. Alors que de nombreuses techniques thérapeutiques pourraient être directement transférées au système médical embarqué (moyens de niveaux 1 et 2, greffe de cellules souches), d'autres nécessitent encore des avancées majeures avant d'être envisageables au cours d'une MES. Il s'agit principalement des dérivés ou substituts sanguins et de la chirurgie.

Hémorragie massive

Le problème du polytraumatisme et de l'hémorragie est majeur, et leur prise en charge constituera un challenge [3]. Le traitement adéquat d'un traumatisme sévère nécessite de disposer de capacités diagnostiques et thérapeutiques complexes, d'un entraînement approprié ou à défaut, de l'aide de systèmes experts d'aide à la décision qui n'existent pas à ce jour [3].

Actuellement, les durées de conservation des dérivés sanguins sont incompatibles avec une MES, et les restrictions de masse et volume ne permettraient pas d'emporter de grandes quantités de produits. Plusieurs solutions potentielles pourraient apporter une réponse à la pénurie attendue ou à l'absence totale de dérivés sanguins. Parmi les options, on peut citer l'autotransfusion, la transfusion de sang frais total entre individus compatibles [78,79], les techniques de congélation profonde des dérivés sanguins à -80 °C [80], le plasma frais déshydraté [81], les substituts sanguins [82] et la culture d'érythrocytes [83].

Chirurgie dans l'espace

Disposer de la capacité de réaliser une chirurgie profonde sera indispensable pour la prise en charge de nombreux traumatismes et de certains états septiques. Il est intéressant (et rassurant) de constater que les interventions les plus probables seront, d'après l'analyse conduite, plutôt mineures. Les sept premières indications chirurgicales seraient, par ordre de probabilité : diverticulite, appendicite, abcès dentaire, cellulite, entorse, pathologie oculaire et fracture de membre. Les interventions les plus lourdes sont bien plus loin dans le classement (traumatisme hépatique, fracture de membre, fracture pelvienne, traumatisme splénique, crânien, thoracique, laparotomie de décompression, etc.). Parmi toutes les pathologies chirurgicales, les interventions pour infections intra-abdominales (cholécystite, appendicite, diverticulite) sont classées très haut dans le tableau, démontrant ainsi l'acuité de la question de la chirurgie préventive. Cette discussion a été récemment publiée par Ball, qui était en faveur d'une intervention prophylactique d'appendicectomie et de cholécystectomie [76].

Défaut d'expertise médicale

L'inaptitude temporaire ou le décès du médecin de bord suite à une maladie ou à un traumatisme est une possibilité. Cette situation aura vraisemblablement un impact important sur le pronostic vital des membres restants et certaines technologies pourraient permettre de limiter ce risque. Même en bonne santé physique et mentale, le médecin de bord ne pourra compter sur aucune aide extérieure pour prendre en charge une infinité potentielle de situations différentes. L'existence de moyens technologiques capables d'augmenter l'autonomie de l'équipage et de réduire les besoins d'assistance télé-médicale pourrait devenir essentielle [14].

Une approche possible, en plein développement, repose sur l'application de technologies avancées, employant invariablement des outils d'intelligence artificielle. Celles-ci sont particulièrement attrayantes dans le contexte d'une MES lointaine, où la télé-médecine sera impossible. Ces outils ont pour objectif d'apporter une aide au diagnostic, à la décision thérapeutique, voire à la réalisation de gestes techniques.

Des algorithmes d'aide au diagnostic médical, employant notamment des réseaux neuronaux, sont utilisés depuis les années 1970 en médecine militaire, dans le but par exemple d'éviter les évacuations médicales non justifiées de sous-marins [84]. Des appareils de monitoring intégrant une aide à la décision médicale sont en cours d'essai, notamment par l'armée américaine. Le système APPRAISE (*Automated Processing of the Physiologic Registry for the Assessment of Injury Severity*) est ainsi capable de diagnostiquer une hémorragie massive de manière autonome avec une aire sous la courbe ROC de 0,85, une sensibilité de 85 % et une spécificité de 73 % [85].

Les retombées potentielles de telles technologies sont immenses. Témoin de l'intérêt suscité par ces technologies émergentes, la compétition *Qualcomm XPrize* récompensera de 10 millions de dollars l'inventeur d'une technologie capable de diagnostiquer dix pathologies fréquentes sans l'intervention d'un médecin (<http://www.qualcommtrixorderxprize.org>).

Dans le cas de la chirurgie, le problème de la formation des équipages et du maintien des compétences durant la mission est majeur. Pour cela, des outils d'aide thérapeutique sont en développement, comme par exemple des robots assistants de chirurgie (*assisted surgery*) et à l'extrême des robots chirurgiens autonomes [86]. La réalité augmentée peut également assister un médecin dans sa tâche, en permettant par exemple de localiser des structures anatomiques. Le projet CAMDASS (*Computer Assisted Medical Diagnosis and Surgery System*) de l'*European Space Agency* est l'un de ces systèmes.

Radiations ionisantes

La présence en haut du classement de l'exposition aux radiations ionisantes est confortée par l'opinion d'experts en radioprotection [5,32]. Des stratégies de réduction des lésions radiques devront être proposées, et pourront inclure des méthodes de blindage et de protection du vaisseau et de l'habitat (zone de refuge ou *safe haven*), un système d'alerte précoce qui permettrait aux membres d'équipage de rejoindre le *safe haven*, l'utilisation de systèmes de propulsion novateurs qui diminueraient le temps de transit ou l'administration d'agents radioprotecteurs, tels que l'amifostine [5]. La capacité de réaliser des greffes de cellules souches hématopoïétiques au cours de telles missions est souhaitable [5].

Désadaptation cardiovasculaire et troubles musculosquelettiques

L'utilisation d'une gravité artificielle, même partielle, permettrait de limiter la désadaptation cardiovasculaire et l'atteinte musculosquelettique et de réduire les besoins d'exercice physique [87]. Deux méthodes principales permettraient d'obtenir une gravité artificielle. La première, qui nécessite des technologies de propulsion qui n'existent pas à l'heure actuelle, consiste à imposer au vaisseau une accélération constante pendant la moitié du voyage, puis à effectuer une manœuvre de retournement et à appliquer une décélération continue pour le reste du trajet [87]. Une autre méthode, techniquement plus aisée, consiste à substituer la gravité par une force centrifuge en faisant tourner tout ou partie du vaisseau (par exemple grâce à une centrifugeuse à bras court installée à l'intérieur d'un module) [87]. La gravité artificielle deviendra probablement indispensable pour les vols interplanétaires lointains (au-delà de Mars), à moins que des technologies de propulsion novatrices ne permettent d'écourter drastiquement les durées de transit.

Conclusion

Les missions d'exploration spatiale vont tester les limites de l'expérience humaine dans la préservation de la santé physique et mentale des équipages.

L'application des conclusions et des données produites par cette investigation permettrait de hiérarchiser les équipements médicaux et la formation des équipages lors de la préparation des MES. Les données obtenues fournissent en effet une indication objective et quantifiée de l'impact du niveau de capacité thérapeutique sur le pronostic vital des équipages au cours de la mission.

L'adéquation des résultats obtenus aux publications sur le sujet et aux opinions des experts impliqués dans la prépa-

ration de ces missions est un argument fort pour la validité de la méthodologie employée.

Comme de nombreuses technologies précédemment développées pour le spatial, ces recherches ont le potentiel d'améliorer significativement les pratiques médicales sur Terre, par exemple en médecine humanitaire, militaire ou en environnement austère.

Tsiolkovski, le père de l'astronautique moderne, déclarait : « La Terre est le berceau de l'humanité, mais on ne passe pas sa vie entière dans un berceau ». Au-delà de leur intérêt scientifique, les missions d'exploration spatiale permettront d'assurer la sauvegarde de l'humanité, puisqu'à terme, elles conduiront à l'établissement d'une civilisation humaine multiplanétaire. Dans cette entreprise ultime et fondamentale, le rôle de la médecine, au même titre que celui de l'ingénierie, sera primordial.

Conflit d'intérêt M. Komorowski et B. Comet déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt.

Références

1. Institute of Medicine (US), Committee on Creating a Vision for Space Medicine during Travel Beyond Earth Orbit, National Academy of Science, Board on Health Sciences Policy (2001) Safe passage astronaut care for exploration missions. In: Ball JR, Evans CH Jr. National Academies Press, Washington, DC
2. Marshburn TH (2008) Acute Care. In: Barratt MR, Pool SL (eds) Principles of Clinical Medicine for Space Flight. Springer, New York, pp 101–22
3. Kirkpatrick AW, Ball CG, Campbell M, et al (2009) Severe traumatic injury during long duration spaceflight: Light years beyond ATLS. *J Trauma Manag Outcomes* 3:4
4. Kuypers MI (2013) Emergency and Wilderness Medicine Training for Physician Astronauts on Exploration Class Missions. *Wild Environ Med* 24:445–9
5. Epelman S, Hamilton DR (2006) Medical Mitigation Strategies for Acute Radiation Exposure During Spaceflight. *Aviat Space Environ Med* 77:130–9
6. Friedberg W, Darden E (2005) Health aspects of radiation exposure on a simulated mission to Mars. Radioactivity in the Environment. Elsevier. Simopoulos ES, Amsterdam, pp 894–901
7. Sams CF, Pierson DL (2008) Immunologic Concerns. In: Barratt MR, Pool SL (eds) Principles of clinical medicine for space flight. Springer, New York, pp 307–15
8. Baker ES, Barratt MR, Wear ML (2008) Human Response to Spaceflight. In: Barratt MR, Pool SL (eds) Principles of clinical medicine for space flight. Springer, New York, NY, pp 27–58
9. Convertino VA, Cooke WH (2005) Evaluation of cardiovascular risks of spaceflight does not support the nasa bioastronautics critical path roadmap. *Aviat Space Environ Med* 76:869–76
10. Karlsson LL, Blogg SL, Lindholm P, et al (2009) Venous gas emboli and exhaled nitric oxide with simulated and actual extravehicular activity. *Respir Physiol Neurobiol* 169:S59–S62
11. Katuntsev VP (2010) Approaches to decompression safety support of EVA for orbital and interplanetary missions. *Acta Astronautica* 66:96–101

12. Webb JT, Pilmanis AA (2005) Altitude decompression sickness between 6858 and 9144 m following a 1-h prebreathe. *Aviat Space Environ Med* 76:34–38
13. Barratt M, Pool SL (2008) Principles of clinical medicine for space flight. Springer
14. Comet B, Berry I, Berthier A, et al (2002) MARSTECHCARE, necessary biomedical technologies for crew health control during long-duration interplanetary manned missions. ESA Contract ESTEC N° 16423/02/NL/LvH. 151 p
15. Smith SM, Lane HW (2008) Spaceflight metabolism and nutritional support. In: Barratt MR, Pool SL (eds) Principles of clinical medicine for space flight. Springer, New York, pp 559–76
16. Lasseur C, Brunet J, de Weever H, et al (2011) MELISSA: the European project of closed life support system. *Gravitational and Space Research* 23:3–12
17. Yunan Yang LT (2009) Silkworms culture as a source of protein for humans in space. *Advances in Space Research* 4:1236–42
18. Nicogossian AE, Huntoon CL, Pool SL (1994) Space physiology and medicine. Lea & Fibiger, Philadelphia
19. Berry C, Dietlein L, Johnson R (1975) Biomedical results of Apollo. Scientific and Technical Information Office, NASA
20. Summers RL, Johnston SL, Marshburn TH, Williams DR (2005) Emergencies in space. *Ann Emerg Med* 46:177–84
21. Peterson LE, Pepper LJ, Hamm PB, Gilbert SL (1993) Longitudinal study of astronaut health: mortality in the years 1959–1991. *Radiat Res* 133:257–64
22. Australian Institute of Health and Welfare (2000) AIHW Burden of Disease Report
23. Center for Disease Control and Prevention (2013) Deaths: Final Data for 2010.
24. Angus DC, Wax RS (2001) Epidemiology of sepsis: an update. *Crit Care Med* 29:S109–16
25. Martin GS (2012) Sepsis, severe sepsis and septic shock: changes in incidence, pathogens and outcomes. *Expert Rev Anti Infect Ther* 10:701–6
26. Lecky FE, Bouamra O, Woodford M, et al (2010) Epidemiology of polytrauma. In: Pape HC, Peitzman A, Schwab CW, Giannoudis PV (eds) Damage control management in the polytrauma patient. Springer, New York, pp 13–24
27. Demirhan R, Onan B, Oz K, Halezeroglu S (2009) Comprehensive analysis of 4205 patients with chest trauma: a 10-year experience. *Interact Cardio Vasc Thorac Surg* 9:450–3
28. Bernardo CG, Fuster J, Bombuy E, et al (2010) Treatment of liver trauma: operative or conservative management. *Gastroenterol Res* 3:9–18
29. Fölsch UR, Nitsche R, Lüdtke R, et al (1997) Early ERCP and papillotomy compared with conservative treatment for acute biliary pancreatitis. The German Study Group on Acute Biliary Pancreatitis. *N Engl J Med* 336:237–42
30. Rubenfeld GD, Caldwell E, Peabody E, et al (2005) Incidence and outcomes of acute lung injury. *N Engl J Med* 353:1685–93
31. Zambon M, Vincent JL (2008) Mortality rates for patients with acute lung injury/ARDS have decreased over time. *Chest* 133:1120–7
32. Cucinotta FA, Kim MH, Ren L, (first) (2006) Evaluating shielding effectiveness for reducing space radiation cancer risks. *Radiat Meas* 41:1173–85
33. Button LA, Roberts SE, Evans PA, et al (2011) Hospitalized incidence and case fatality for upper gastrointestinal bleeding from 1999 to 2007: a record linkage study. *Aliment Pharmacol Ther* 33:64–76
34. Leontiadis GI, Sharma VK, Howden CW (2007) Proton pump inhibitor therapy for peptic ulcer bleeding: Cochrane collaboration meta-analysis of randomized controlled trials. *Mayo Clin Proc* 82:286–96
35. Romero V, Akpinar H, Assimos DG (2010) Kidney Stones: a global picture of prevalence, incidence, and associated risk factors. *Rev Urol* 12:e86–e96
36. Van Gijn J, Kerr RS, Rinkel GJ (2007) Subarachnoid haemorrhage. *Lancet* 369:306–18
37. Syme PD, Byrne AW, Chen R, et al (2005) Community-based stroke incidence in a Scottish population: the Scottish Borders Stroke Study. *Stroke* 36:1837–43
38. Rodgers H, Thomson R (2008) Functional status and long term outcome of stroke. *BMJ* 336:337–8
39. Gillis DB, Hamilton DR (2012) Estimating outcomes of astronauts with myocardial infarction in exploration class space missions. *Aviat Space Environ Med* 83:79–91
40. Bederman SS, Murnaghan O, Malempati H, et al (2011) In-hospital mortality and surgical utilization in severely polytraumatized patients with and without spinal injury. *J Trauma* 71:E71–E8
41. Hong JJ, Cohn SM, Perez JM, et al (2002) Prospective study of the incidence and outcome of intra-abdominal hypertension and the abdominal compartment syndrome. *Br J Surg* 89:591–6
42. Bliuc D, Nguyen ND, Milch VE, et al (2009) Mortality risk associated with low-trauma osteoporotic fracture and subsequent fracture in men and women. *JAMA* 301:513–21
43. Simons FE (2009) Anaphylaxis: Recent advances in assessment and treatment. *J Allergy Clin Immunol* 124:625–36
44. Vann RD (2004) The Divers Alert Network 2004 Annual Report on Decompression Illness, Diving Fatalities and Project Dive Exploration. DAN
45. Rice SA (2004) Human health risk assessment of CO₂: survivors of acute high-level exposure and population sensitive to prolonged low-level exposure. Poster 11-01 presented at 3rd Annual conference on carbon sequestration, 3–6 May 2004, Alexandria, VA, USA
46. National Health Service (2010) Kidney disease key facts and figures [Internet]. Available from www.healthcheck.nhs.uk/document.php?o=81
47. Summers RL, Coleman TG (2002) Computer systems analysis of the cardiovascular mechanisms of reentry orthostasis in astronauts. *Comput Cardiol* 29:521–4
48. Bouchama A, Knochel JP (2002) Heat Stroke. *N Engl J Med* 346:1978–88
49. Holzheimer RG, Mannick JA (eds) (2001) Surgical treatment: evidence-based and problem-oriented. Zuckschwerdt, Munich
50. Tapson VF (2008) Acute pulmonary embolism. *N Engl J Med* 358:1037–52
51. Volz KA, Canham L, Kaplan E, et al (2013) Identifying patients with cellulitis who are likely to require inpatient admission after a stay in an ED observation unit. *Am J Emerg Med* 31:360–4
52. Dormandy J, Heeck L, Vig S (1999) Acute limb ischemia. *Semin Vasc Surg* 12:148–53
53. Mallet ML (2002) Pathophysiology of accidental hypothermia. *QJM* 95:775–85
54. Knake S, Rosenow F, Vescovi M, et al (2001) Incidence of status epilepticus in adults in Germany: a prospective, population-based study. *Epilepsia* 42:714–8
55. Rossetti AO, Hurwitz S, Logroscino G, Bromfield EB (2006) Prognosis of status epilepticus: role of aetiology, age, and consciousness impairment at presentation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 77:611–5
56. Van de Beek D, de Gans J, Tunkel AR, Wijdicks EF (2006) Community-acquired bacterial meningitis in adults. *N Engl J Med* 354:44–53
57. Torén K, Hermansson BA (1999) Incidence rate of adult-onset asthma in relation to age, sex, atopy and smoking: a Swedish population-based study of 15813 adults. *Int J Tuberc Lung Dis* 3:192–7

58. American Burn Association (2012) National Burn Repository Annual Report.
59. Muir JF, Cuvelier A, Molano C, Viacroze C (2007) Acute respiratory distress in the adult. Foreign bodies of the upper respiratory tract. *Rev Prat* 57:1487–95
60. Thorsen K, Søreide JA, Kvaløy JT, et al (2013) Epidemiology of perforated peptic ulcer: age- and gender-adjusted analysis of incidence and mortality. *World J Gastroenterol* 19:347–54
61. Fonarow GC, Adams KF, Abraham WT, et al (2005) Risk stratification for in-hospital mortality in acutely decompensated heart failure: classification and regression tree analysis. *JAMA* 293:572–80
62. Bretherick AD, Craig DG, Masterton G, et al (2011) Acute liver failure in Scotland between 1992 and 2009; incidence, aetiology and outcome. *QJM* 104:945–56
63. Fartoukh M, Khoshnood B, Parrot A, et al (2012) Early prediction of in-hospital mortality of patients with hemoptysis: an approach to defining severe hemoptysis. *Respiration* 83:106–14
64. Ringdahl E, Teague L (2006) Testicular torsion. *Am Fam Physician* 74:1739–43
65. Otto C, Comtois J-M, Sargsyan A, et al (2010) The Martian chronicles: remotely guided diagnosis and treatment in the Arctic Circle. *Surg Endosc* 24:2170–7
66. Dawson DL (2008) On the practicality of emergency surgery during long-duration space missions. *Aviat Space Environ Med* 79:712–3
67. Saluja IS, Williams DR, Woodard D, et al (2008) Survey of astronaut opinions on medical crewmembers for a mission to Mars. *Acta Astronautica* 63:586–93
68. Campbell M, Billica R (2008) Surgical capabilities. In: *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*. Barratt & Pool, Springer: pp. 123–37
69. Jay GD, Lee P, Goldsmith H, et al (2003) CPR effectiveness in microgravity: comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med* 74:1183–9
70. Grasser L, Helleringer F (2012) “Morphee”, a flying intensive care unit. *Rev Infirm* 186:22–4
71. Norfleet W (2000) Anesthetic concerns of spaceflight. *Anesthesiology* 98:1219
72. Agnew J, Fibuch E, Hubbard J (2004) Anesthesia during and after exposure to microgravity. *Aviat Space Environ Med* 75:571–80
73. Komorowski M, Watkins SD, Lebuffe G, Clark JB (2013) Potential Anesthesia Protocols for Space Exploration Missions. *Aviat Space Environ Med* 84:226–33
74. Putcha L (1999) Pharmacotherapeutics in space. *J Gravit Physiol* 6:P165–8
75. Watkins S (2012) Space Medicine Exploration: Full Medical Condition List Rev B (No. JSC-65722). NASA Center for Aerospace Information. Retrieved from: https://humanresearchwiki.jsc.nasa.gov/images/c/cc/Space_Medicine_Exploration_Condition_List_Rev_B_2012.pdf
76. Ball CG, Kirkpatrick AW, Williams DR, et al (2012) Prophylactic surgery prior to extended-duration space flight: is the benefit worth the risk? *Can J Surg* 55:125–31
77. Kirkpatrick AW, Keaney M, Hemmelgarn B, et al (2009) Intra-abdominal pressure effects on porcine thoracic compliance in weightlessness: implications for physiologic tolerance of laparoscopic surgery in space. *Crit Care Med* 37:591–7
78. Holcomb JB (2010) Optimal use of blood products in severely injured trauma patients. *Hematology Am Soc Hematol Educ Program* 2010:465–9
79. Miller TE (2013) New evidence in trauma resuscitation - is 1:1:1 the answer? *Perioper Med* 2:13
80. Fabricant L, Kiraly L, Wiles C, et al (2013) Cryopreserved deglycerolized blood is safe and achieves superior tissue oxygenation compared with refrigerated red blood cells: a prospective randomized pilot study. *J Trauma Acute Care Surg* 74:371–6
81. Daban JL, Clapson P, Ausset S, et al (2010) Freeze dried plasma: a French army specialty. *Crit Care* 14:412
82. Chen J-Y, Scerbo M, Kramer G (2009) A Review of Blood Substitutes: examining the history, clinical trial results, and ethics of hemoglobin-based oxygen carriers. *Clinics (Sao Paulo)* 64:803–13
83. Giarratana M-C, Rouard H, Dumont A, et al (2011) Proof of principle for transfusion of in vitro generated red blood cells. *Blood* 118:5071–9
84. Perrotta PL, Perkins EM (1993) A History of computer-assisted medical diagnosis at Naval Submarine Medical Research Laboratory, Naval Submarine Medical Research Laboratory. Groton, CT
85. Reisner AT, Khitrov MY, Chen L, et al (2013) Development and validation of a portable platform for deploying decision-support algorithms in prehospital settings. *Appl Clin Inform* 4:392–402
86. Gomes P (2011) Surgical robotics: reviewing the past, analyzing the present, imagining the future. *Robot Cim-Int Manuf* 27:261–6
87. Watenpaugh DE (2001) Fluid volume control during short-term space flight and implications for human performance. *J Exp Biol* 204:3209–15