

que des sutures, des interventions dentaires ou un sondage urinaire.

En complément, les astronautes bénéficient d'une surveillance et d'une assistance depuis le sol grâce aux *flight surgeons* (médecins affectés aux vols), spécialistes en médecine aérospatiale. Depuis les centres de contrôle terrestres, ils analysent en continu les paramètres physiologiques des astronautes et leur prodiguent une téléassistance en cas de besoin. Un suivi régulier médical et psychologique permet d'apporter des conseils de santé et de gérer des affections mineures à l'aide de la pharmacie de bord.

Un chiffre illustre la réussite et la robustesse des stratégies de contrôle du risque médical en orbite terrestre basse: aucune évacuation pour raison de santé n'a été nécessaire à bord de l'ISS depuis le début de son occupation en 2000! Cette donnée vient pour le moment contredire les projections statistiques, initialement plus pessimistes.

Ce succès ne doit pas masquer le fait que chaque ligne de défense (prévention, contre-mesures et autonomie) possède ses limites. Certains exemples de points de fragilité techniques et stratégiques concernant l'autonomie médicale à bord de l'ISS laissent entrevoir les immenses difficultés et dilemmes médicaux soulevés par la perspective de missions plus lointaines, comme un vol vers Mars.

Dans une station conçue pour six personnes, il est impossible d'espérer trouver un plateau technique de soins complets pour des questions de charge utile, de volume, de coût, de compétences et de ressources humaines. L'ISS n'est pas équipée pour du soin intensif lourd et prolongé. Il faut donc faire des compromis en ciblant l'offre de soin vers les pathologies à plus forte probabilité d'incidence. Ces pathologies sont soit conventionnelles survenant spontanément pendant le vol sans lien avec la mission (comme un abcès dentaire), soit circonstancielles, c'est-à-dire favorisées ou engendrées par l'exposition à l'une des nombreuses contraintes du milieu spatial. Cependant, en cas d'accident grave, les options de traitement seraient rapidement dépassées. La station ne possède ni produit sanguin labile (culots de sang, dans le cadre d'une transfusion par exemple) ni matériel chirurgical lourd pour réaliser une intervention digestive ou vasculaire urgente, ni le personnel nécessaire pour gérer le nombre élevé de tâches critiques imposées par la prise en charge d'un blessé grave. Parmi les pistes de recherche pour renforcer l'autonomie médicale en milieu spatial, la Nasa a par exemple testé dans l'ISS un générateur de sérum physiologique (nommé IVGEN). Ce soluté de première nécessité permet de préparer des médicaments et d'hydrater par voie intraveineuse des patients gravement malades.

Une autre difficulté concerne la séparation géographique entre l'équipage isolé dans l'espace et un expert médical au sol. Cette configuration rend plus complexe l'assistance médicale pour de multiples raisons. Des pertes de signal régulières interrompent souvent le lien audio et vidéo entre la Terre et l'ISS, gênant la transmission d'informations. En cas de situation médicale critique à bord, l'évaluation de la situation risquerait d'être confuse de part et d'autre, l'urgence étant source d'erreurs d'interprétation et de biais cognitifs, comme en témoigne le difficile exercice de régulation médicale au sein des Samu. La différence de langue maternelle entre intervenants entrave les échanges. Dans le cas d'un voyage vers Mars, cette option de coopé-

L'évacuation vers la Terre présente parfois davantage de risques pour le blessé

ration à distance serait fortement affectée, voire inutile: les communications radio seront soumises à une telle latence (parfois plus de vingt minutes dans chaque sens) qu'il sera impossible d'interagir en temps réel lors d'une urgence. Certaines équipes de recherche, dont la nôtre (avec le Centre européen de réalité virtuelle de Brest), travaillent ainsi sur des projets d'aide à la décision médicale et à la perception du risque (côté astronaute) en utilisant différentes technologies comme l'intelligence artificielle, les agents conversationnels (*chatbots*) et la réalité augmentée.

Mais revenons à bord de l'ISS. Pourrait-on simplement, en cas de symptôme menaçant, opter pour une évacuation médicale? Après tout, les capsules *Soyouz* ou *Crew Dragon*, arrimées à la station, permettent un retour en quelques heures sur Terre. Le temps maximal entre une décision d'évacuation et une admission en centre hospitalier est estimé à une trentaine d'heures. Ainsi, l'équipage à bord d'une station orbitale est plus proche d'un centre hospitalier moderne que certains navigateurs ou les scientifiques en hivernage en Antarctique. Pour ces derniers, l'évacuation prend jusqu'à plusieurs jours, voire se



révèle impossible en raison de conditions météorologiques.

Cet avantage est toutefois contrebalancé par de nombreuses difficultés, limitant l'option de l'évacuation médicale. Impossible par exemple d'envisager à ce jour un transfert d'astronaute nécessitant des soins critiques entre l'ISS et la Terre, sur le modèle des évacuations interhospitalières mises en lumière par la pandémie de SARS-CoV-2. Ce type de transfert de patients intubés, ventilés et sous sédatif nécessite une logistique lourde, en termes de matériel thérapeutique (perfusions, pousse-seringues, respirateur relié au patient par une sonde d'intubation), de surveillance (moniteur), de personnel. Il n'est tout simplement pas possible de faire entrer autant de matériel de soin dans une capsule au vu de son étroitesse.

Pour l'ISS, la décision d'une éventuelle évacuation médicale encourt donc deux écueils stratégiques. Le premier serait d'évacuer inutilement, à coût élevé, une pathologie bénigne qui aurait pu être traitée avec la pharmacie de bord. À l'inverse, il serait catastrophique de sous-estimer la gravité initiale ou

Les astronautes s'entraînent à réaliser un massage cardiaque. Différentes méthodes ont été proposées et comparées. Pour maintenir le contact entre le soignant et le patient, certaines approches consistent à retenir le malade avec ses jambes, d'autres utilisent des sangles pour s'arrimer au sol. Mais la méthode qui semble la plus efficace est celle du poirier, illustrée sur la photo.

potentielle (en cas d'évolution défavorable) d'une affection, de manquer la fenêtre temporelle optimale pour évacuer, puis de se retrouver à court d'options thérapeutiques au sein de la station.

Un incident survenu il y a quelques années dans l'ISS résume ces difficultés. Un membre d'équipage participait à une étude échographique sur la paroi des vaisseaux sanguins. Lors d'un examen dans le cadre de cette expérience, l'équipe a découvert fortuitement une thrombose de sa veine jugulaire interne. L'impensable est en effet un facteur de risque pour la formation de ces caillots sanguins, la stagnation du flux veineux sanguin favorisant l'hypercoagulabilité, comme lors d'un alitement prolongé. Cette thrombose était problématique. Certes, l'astronaute ne présentait aucun symptôme de mauvaise tolérance. Mais l'éventuel détachement de ce caillot de la paroi du vaisseau aurait probablement entraîné une grave embolie pulmonaire, responsable d'une défaillance cardiaque possiblement fatale.

Les médecins de vol étaient donc face à une situation délicate. Fallait-il opter pour la

stratégie «charger et foncer» (*scoop and run*), consistant à évacuer un patient à risque de décompensation le plus vite possible vers un centre de référence, avec un traitement correctif léger lors de la prise en charge? Ou devait-on choisir la stratégie inverse, *stay and play* (littéralement «rester et jouer»), plus interventionniste, et déplaçant des moyens médicaux au plus près du patient afin de le stabiliser avant un hypothétique transport?

Dans le cas présenté, la décision a été prise de garder l'astronaute en vol: un traitement anticoagulant permettant de limiter l'extension du caillot a été commencé à bord avec la petite réserve de la pharmacie. Grâce aux ravitaillements par cargo spatial vers la station, le traitement a été maintenu jusqu'à la fin de la mission, et aucune complication n'a été détectée lors de la surveillance échographique régulière. Les médecins des vols ont donc opté pour un compromis entre les deux stratégies pré-hospitalières. Cependant, plus l'éloignement de la Terre sera grand, plus la méthode *stay and play* deviendra la seule option possible. Le ravitaillement médicamenteux ou le renfort humain sera compliqué, voire impossible, en cas de mission sur le sol martien.

L'IMPESANTEUR SIMULÉE

La médecine spatiale reste un champ de recherche très ouvert, dont les problématiques évoluent avec la perspective de missions lointaines ou d'une ouverture au tourisme. Pour approfondir nos connaissances dans ce domaine, l'ISS demeure, bien sûr, un laboratoire clé consacré à la science en impesanteur. Mais d'autres approches permettent de simuler (au moins en partie) ces conditions si particulières: les vols paraboliques en avion (*voir l'encadré page 52*) ou les études en immersion sèche. Ces dernières sont notamment réalisées au Medes, l'Institut de médecine et physiologie spatiale, à Toulouse, un établissement de référence en physiologie et médecine aérospatiale. L'immersion sèche reproduit les effets de l'impesanteur en immergeant un sujet (isolé de l'eau par une grande toile imperméable) dans une grande baignoire. Cette configuration mime les effets de l'impesanteur en supprimant les points d'appuis, afin d'étudier par exemple les nombreux effets musculaires ou cardiaques associés.

La médecine terrestre bénéficie aussi de cette activité de recherche. Par exemple, le laboratoire Comete, de l'université de Caen, ou le Caps (Cognition, action et plasticité sensorimotrice), de l'université de Bourgogne, pour ne citer qu'eux, orientent une partie de leurs recherches vers la médecine spatiale. En effet, le handicap moteur, l'alitement prolongé des patients hospitalisés, ou encore les pathologies de l'oreille interne par exemple présentent des

La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe

analogies avec les modifications physiologiques induites par l'absence de pesanteur.

Le champ de la télémédecine bénéficie également de l'activité spatiale. À titre d'exemple, en 2017, lors de la mission *Proxima*, l'astronaute Thomas Pesquet a participé à la mise en service d'un échographe téléopéré (*Echo*). Depuis le sol, un médecin peut à présent téléguider une sonde d'échographie présente à bord de l'ISS. Sur Terre, grâce à cette technologie, un expert intervient directement auprès d'un patient à distance et contrôle en temps réel la qualité des images recueillies, améliorant la performance diagnostique de l'examen. Citons aussi le maillot de corps développé par l'Agence spatiale canadienne, nommé «biomoniteur», qui enregistre les signes vitaux de l'astronaute sans être invasif. Les nouvelles technologies comme la réalité augmentée, l'intelligence artificielle pour le support décisionnel, ou l'impresion 3D pour le matériel médical offrent également des perspectives intéressantes d'assistance au soin en milieu isolé.

Jusqu'à présent, une collaboration étroite entre programmeurs de mission, ingénieurs, chercheurs, instructeurs d'astronautes et médecins du spatial a permis de minimiser les risques médicaux au sein des stations orbitales et d'établir des standards de sécurité élevés pour les astronautes. La présence humaine dans l'espace profond est un défi autrement plus complexe. Aux questions techniques viendront invariablement s'ajouter des interrogations éthiques en cas de pathologie grave nécessitant des ressources au-delà de celles disponibles. Dans une petite station sur la Lune ou sur Mars sans ravitaillement ni renfort ou évacuation immédiate possible, la probabilité de survie serait alors très faible. Néanmoins, certaines avancées technologiques fourniront peut-être des solutions pour accroître la sécurité lors de ces missions qui repoussent les limites de l'exploration. D'ambitieux projets de recherche vont jusqu'à envisager la piste de l'hibernation humaine. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Komorowski *et al.*, **On the challenges of anesthesia and surgery during interplanetary spaceflight**, *Anesthesiology*, 2021.

J. Hinkelbein *et al.*, **Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight-a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine – Space Medicine Group (ESAM-SMG)**, *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine*, 2020.

M. A. Custaud *et al.* (éd.), **L'Humain et l'Espace**, Books on Demand, 2020.

N. Pattyn et P. F. Migeotte, **Vivre dans l'espace**, *Pour la Science*, n° 422, 2012.