



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



REVUE GÉNÉRALE

L'espace au service de la santé[☆]

Space for health

Guillemette Gauquelin-Koch^a, Adeline Martin^{b,*},
Audrey Berthier^b, Marc-Antoine Custaud^{c,d},
Alain Luciani^e, Annelise Tran^f, Thibault Catry^g

^a Centre national d'études spatiales (CNES), 1, place Maurice-Quentin, 75001 Paris, France

^b Institut de médecine et physiologie spatiale (MEDES), 1, avenue du Professeur-Jean-Poulhes, 31400 Toulouse, France

^c Laboratoire Mitovasc, faculté de santé, université d'Angers, 28, rue Roger-Amsler, 49045 Angers, France

^d Centre de recherche clinique, CHU d'Angers, 4, rue Larrey, 49933 Angers, France

^e Imagerie médicale, hôpitaux universitaires Henri-Mondor, AP-HP, université Paris est Créteil, 1, rue Gustave-Eiffel, 94000 Créteil, France

^f CIRAD, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500, rue Jean-François-Breton, 34093 Montpellier cedex, France

^g ESPACE-DEV, IRD, maison de la Télédétection, université Guyane, université Réunion, université Antilles, université Avignon, 500, rue Jean-François-Breton, 34093 Montpellier cedex, France

Reçu le 31 mars 2025 ; accepté le 14 mai 2025

Disponible sur Internet le 23 juin 2025

MOTS CLÉS

Médecine
aérospatiale ;
Télémédecine ;
Impesanteur ;
Surveillance
épidémiologique ;
Technologie
biomédicale ;
Communications par
satellite ;
Médecine intégrative/méthodes ;

Résumé L'exploration spatiale dépasse la simple conquête de nouveaux territoires, elle représente aussi un levier majeur d'innovation dans le domaine médical. L'environnement spatial, caractérisé par la microgravité, les radiations et l'isolement, impose des défis physiologiques, psychologiques et biologiques aux astronautes. Pour préserver leur santé, des solutions technologiques avancées sont développées, allant de la télémédecine aux systèmes de surveillance physiologique ou plus généralement à des systèmes d'assistance pour l'aide au diagnostic et aux soins. Les défis que posent les missions spatiales permettent ainsi d'accélérer des innovations pour répondre à la fois aux besoins spatiaux et à des applications sur Terre, notamment pour le suivi médical en environnements isolés ou extrêmes où l'accès aux soins est limité. Par ailleurs, les technologies ou données issues du spatial, notamment grâce aux satellites d'observation, de communication ou aux services de géolocalisation, peuvent jouer un rôle crucial en santé publique. Elles permettent de contribuer à la surveillance sanitaire, de détecter des risques environnementaux affectant la santé humaine et d'améliorer l'accès aux soins

[☆] Séance du 13/05/2025.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : adeline.martin@medes.fr (A. Martin).

<https://doi.org/10.1016/j.banm.2025.05.010>

0001-4079/© 2025 l'Académie nationale de médecine. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires.

Physiologie/méthodes ;
Déconditionnement
cardiovasculaire ;
Contre-mesures à
l'apesanteur ;
Vol spatial ;
Humains ;
Astronaute

KEYWORDS

Aerospace medicine;
Telemedicine;
Weightlessness;
Epidemiological
monitoring;
Biomedical
technology;
Satellite
communications;
Integrative
medicine/methods;
Physiology/methods;
Cardiovascular
deconditioning;
Weightlessness
countermeasures;
Space flight;
Humans;
Astronauts

à distance, notamment dans les zones reculées. En France, le Centre national d'études spatiales (CNES) et l'Institut de médecine et de physiologie spatiales (MEDES) sont des acteurs clés dans ces avancées. En collaboration avec les communautés scientifiques et industrielles, ils participent activement à la recherche et au développement de nouvelles technologies médicales adaptées aux défis de l'exploration spatiale et transposables aux besoins terrestres. Grâce à ces efforts, l'espace devient un laboratoire d'innovation médicale, dont les retombées bénéficient aussi bien aux astronautes qu'aux populations terrestres confrontées à des défis similaires en matière de santé.

© 2025 l'Académie nationale de médecine. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires.

Summary Space exploration goes beyond the mere conquest of new territories, it is also a major driver of innovation in the medical field. The space environment, characterized by microgravity or partial gravity, radiations, isolation and confinement, presents significant physiological, psychological and biological challenges for astronauts. To safeguard their health, advanced technological solutions are being developed, ranging from telemedicine to physiological monitoring systems and technologies for assistive diagnostic and care. Space challenges and constraints and the related R&D are thus a driver and an accelerator for health innovations that may benefit both for space and health on earth, especially for extreme and remote environments where access to healthcare is limited. Moreover, space-derived technologies and data, particularly thanks to observation, geolocalisation and communication satellites, play a crucial role in public health. They can contribute to early health warning and epidemiological surveillance, to the detection of environmental risks affecting human health, and the improvement of remote healthcare access, especially in isolated areas. In France, the National Centre for Space Studies (CNES) and the Institute for Space Medicine and Physiology (MEDES) are key players in these advancements. In collaboration with scientific and industrial communities, they actively contribute to research and the development of new medical technologies tailored to the challenges of space exploration while being transferable to terrestrial applications. Thanks to these efforts, space has become a laboratory for medical innovation, with benefits extending not only to astronauts but also to populations on Earth facing similar health challenges.

© 2025 l'Académie nationale de médecine. Published by Elsevier Masson SAS. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Introduction

L'exploration spatiale ne se limite pas à la conquête et la compréhension de nouveaux territoires ; elle ouvre également des perspectives majeures et de nouvelles opportunités pour accélérer des innovations terrestres, notamment en santé [1].

D'une part, l'environnement spatial fournit un milieu confiné et isolé très particulier, associé à des contraintes de microgravité et d'exposition aux radiations, qui modifient de nombreux phénomènes physiologiques et biologiques. D'autre part, le spatial et ses défis et contraintes peuvent contribuer à accélérer des innovations en santé avec des applications à la fois pour le contexte spatial et pour des applications sur Terre dans le domaine médical.

En France, le Centre national d'études spatiales (CNES), l'Institut de médecine et physiologie spatiale (MEDES) et la communauté scientifique et industrielle, contribuent activement à ces avancées pour façonner la médecine de demain, en améliorant aussi bien la prise en charge des patients que la compréhension des interactions entre santé et environnement.

Place des sciences de la vie dans les missions d'exploration spatiale

Les sciences de la vie sont très largement représentées dans les missions d'exploration spatiales, notamment via les recherches scientifiques qui sont menées avant, pendant et après les missions.

Rôle du CNES et de MEDES

À la fois agence de programme, centre technique et opérateur spatial, le Centre national d'études spatiales (CNES), créé en 1961, réunit toutes les fonctions permettant au gouvernement français de définir et mettre en œuvre sa stratégie spatiale, ainsi que de déployer les politiques publiques qui requièrent l'appui du secteur spatial (gestion des territoires, agriculture, santé, télécommunications, catastrophes naturelles, défense, etc.). Le CNES mène de nombreuses actions dans le domaine de la santé, en exploitant les technologies spatiales pour améliorer la recherche biomédicale et les applications médicales terrestres. En plus d'animer la communauté scientifique et d'accompagner les

laboratoires de recherche pour comprendre l'adaptation des organismes vivants à l'espace et mettre en place des moyens et technologies pour suivre la santé des équipages lors de missions habitées tout en utilisant ces défis pour accélérer des innovations terrestres, le CNES a mis en place le programme Connect by CNES [2] pour mettre les données et technologies spatiales au service des acteurs économiques et territoriaux, et de la société civile en général, en particulier pour des applications en santé.

En support du CNES et d'autres organismes dont l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Institut de médecine et physiologie spatiale (MEDES) œuvre depuis près de 35 ans pour maintenir et contribuer à développer une compétence française en médecine et physiologie spatiales et pour promouvoir les applications de la recherche spatiale ou des technologies, services ou données issus du spatial dans le domaine de la santé.

En particulier, les activités de MEDES sont réparties en trois missions principales :

- fournir une expertise et des services pour le suivi médical des équipages et pour la préparation, la réalisation et le suivi d'expériences scientifiques ou d'évaluations technologiques dans le domaine médical et en sciences de la vie, et ce pour les agences spatiales ainsi que pour les scientifiques et industriels ;
- conduire des études cliniques pour la recherche médicale spatiale et terrestre grâce notamment à des études de simulation de l'impesanteur au sol réalisées dans sa clinique spatiale [3] ;
- favoriser des applications ou co-innovations entre spatial et santé en faisant le lien entre les écosystèmes du spatial et de la santé pour identifier des cas d'usages et des technologies d'intérêts pour favoriser le développement technologique et les innovations, en particulier dans les domaines de la santé numérique, des dispositifs médicaux ou encore pour la surveillance sanitaire.

Sciences de la vie et exploration spatiale

Ces dernières décennies ont permis à l'humain de remplir avec des conditions médicales très satisfaisantes de nombreuses missions dans des stations spatiales en orbite basse. Les recherches ont permis d'accumuler de nombreux savoirs sur les modifications physiologiques de l'humain induites par les vols spatiaux. Si jusqu'à présent, toutes ces altérations étaient en partie réversibles, et relativement bien tolérées par l'organisme, notamment du fait de la courte durée des vols (environ 6 mois), il n'en sera pas de même avec les vols vers la Lune et Mars.

La perspective des missions d'exploration lunaire à court terme et plus lointaines vers Mars à long terme nécessitent de prendre en compte de nouveaux risques [4] : la durée de vol, la distance et l'isolement, le niveau de radiations plus élevé, le déploiement d'un habitat en terrain hostile, le délai des contacts avec la Terre, et l'impossibilité de retour rapide sur Terre en cas d'urgence nécessitent l'adaptation de la médecine préventive et curative. La proposition d'un entraînement personnalisé pour maintenir les performances physiques et cognitives, de nouveaux moyens de prévention (les contre-mesures), le développement de capteurs spéci-

fiques pour améliorer le diagnostic, et de nouveaux moyens pour l'assistance au diagnostic et aux soins et pour la médecine spatiale d'urgence sont nécessaires pour l'exploration humaine de la Lune et Mars, en plus de la mise en place du support-vie qui accompagneront ces longs voyages.

Au travers des questions majeures que sont comment accompagner l'exploration humaine de l'espace et comment le vivant terrestre s'adaptera-t-il aux contraintes spatiales, le CNES met en place les moyens d'une réduction des risques pour la santé humaine dans l'espace reposant sur trois piliers : la prévention, les contre-mesures et l'autonomie à bord. La prévention et le développement de programmes de contre-mesures efficaces passent par une compréhension approfondie des effets de l'environnement spatial (microgravité, confinement et radiation) sur l'ensemble des systèmes physiologiques et des aptitudes psychologiques et donc de la santé et des performances des astronautes.

Retombées sociétales de ces études

Il est indispensable de rappeler que toutes ces recherches ont bien entendu des retombées sociétales que ce soit pour la meilleure compréhension de certaines maladies induites par l'inactivité ou pour l'accélération du développement d'appareils médicaux nécessaires au suivi médical personnalisé tant sur Terre que dans l'espace.

Les modèles de microgravité qui induisent différentes dysfonctions de façon réversible, offrent un modèle expérimental de plusieurs pathologies : amyotrophie, ostéoporose, syndrome métabolique, syncope, atteinte neuromusculaire pour mieux les diagnostiquer, en comprendre les mécanismes et proposer des thérapeutiques innovantes.

Ce thème de recherche permet aussi d'approfondir la connaissance du vivant. Le rôle de la gravité se manifestant auprès de tous nos organes, c'est l'occasion de conduire des études de physiologie intégrative abordant les interrelations entre nos différents systèmes.

Enfin tous les moyens mis en œuvre pour développer une médecine dans cette condition environnementale extrême (nécessité de miniaturisation, d'autonomisation, de robustesse, d'approche la moins invasive possible et de personnalisation) contribuent au progrès médical pour l'ensemble de la population.

Biologie, médecine et physiologie spatiales – applications pour la recherche médicale

Les recherches biomédicales menées à l'occasion des vols spatiaux doivent non seulement permettre aux astronautes de remplir leur mission dans les meilleures conditions mais elles utilisent aussi cet environnement particulier pour mieux comprendre notre physiologie et certains phénomènes biologiques et ainsi contribuer au progrès médical et à l'innovation [5]. Étudier le corps humain en l'absence de gravité, c'est comprendre les interactions entre l'ensemble de nos grandes fonctions et cette force omniprésente qui a façonné le vivant [6].

Approche expérimentale et modèles au sol

Conduire des recherches en médecine et physiologie spatiale se heurte à deux difficultés majeures, un accès difficile à l'environnement spatial en condition réelle et le faible nombre d'astronautes, sujets d'études. Les vols paraboliques permettant une micropesanteur réelle de 20–30 secondes et sont utiles pour certaines études notamment neurosensorielles mais aussi pour tester du matériel biomédical avant envoi dans l'ISS. Afin de consolider l'approche méthodologique, des modèles au sol sont proposés chez l'humain, financés conjointement entre le CNES et l'Agence spatiale européenne (ESA).

Les études cliniques au sol sont réalisées principalement à l'aide du modèle d'alitement anti-orthostatique, appelé « Head Down Bed-Rest » [7], celui d'immersion sèche [8,9] et lors d'expériences de confinement. Notons l'importance actuellement apportée à l'approche intégrative [10] et multi-omique [11] et la mise à disposition grandissante par les agences spatiales pour la communauté scientifique de leurs bases de données afin de permettre des études rétrospectives.

Il existe aussi des modèles animaux, tissulaires et cellulaires qui peuvent être mis à contribution au sol ainsi que dans l'espace et particulièrement utiles pour étudier le risque radiatif.

Déconditionnement et atteintes liées à la microgravité

Adapté à l'environnement spatial, l'astronaute se déconditionne à la gravité. Le principal facteur de ce déconditionnement à la gravité est l'absence d'activité physique si bien que l'astronaute souffre des troubles liés à la sédentarité. C'est lors du retour sur terre que ce déconditionnement s'exprime, il est heureusement limité par des méthodes prophylactiques, appelées contre-mesures et mises en œuvre tout au long de la mission et lors du retour sur terre.

Le système cardiovasculaire fait preuve d'une attention toute particulière [12]. Il devient moins réactif pour réguler la pression artérielle en orthostatisme (c'est le risque de syncope), la capacité à réaliser un exercice physique, estimée par la VO_2 max, diminue systématiquement, les artères des membres inférieurs diminuent en diamètre, les cellules endothéliales dysfonctionnent diminuant la capacité de vasodilatation des artéoles et laissant craindre l'apparition d'un risque vasculaire lors des missions spatiales de très longues durées [13]. Les muscles responsables de la posture s'atrophient, ce sont essentiellement les fibres de type I, tonique qui sont atteintes [14]. Les os porteurs perdent de leur densité (perte de l'ordre de 1 % par mois au niveau de la hanche [15]) et l'architecture osseuse est modifiée. C'est l'absence de contraintes physiques appliquées au squelette qui est responsable de cette atteinte osseuse. Chez certains astronautes celle-ci ne serait pas totalement réversible [16]. Le métabolisme énergétique est modifié, avec l'apparition d'une résistance à l'insuline conduisant à une inflexibilité métabolique définie comme une incapacité de l'organisme à ajuster l'utilisation de ses substrats énergétiques [17].

Les transferts liquidiens au niveau thoraco-céphalique sont aussi une préoccupation médicale majeure. S'ils induisent à la phase initiale du vol une bouffissure du visage et des céphalées, une diminution secondaire du volume plasmatique permet rapidement de réguler cette hypervolémie relative. En 2011, la description d'un syndrome neuro-oculaire (appelé « SANS » Spaceflight Associated Neuro-Ocular Syndrome) chez certains astronautes a permis d'objectiver un œdème du disque optique, des plis choroïdaux et un épaississement de la gaine du nerf optique. Si les conséquences fonctionnelles restent à ce jour limitées, quelques astronautes ont gardé des atteintes morphologiques. Il s'agit aujourd'hui d'un risque avéré à prendre en compte et dont l'étude se poursuit activement. Les transferts liquidiens thoraco-céphaliques et l'augmentation de la pression intracrânienne sont les principaux mécanismes envisagés à ce jour [18].

Biologie spatiale

Des années de recherche à bord de la station spatiale internationale ont montré que ces conditions uniques permettent d'envisager des projets de recherche utilisant l'orbite basse comme catalyseur d'innovation [19]. En effet, la microgravité offre un environnement unique pour la recherche biomédicale, permettant d'étudier des processus biologiques avec une précision accrue. En l'absence de gravité terrestre, les cellules adoptent une croissance tridimensionnelle moins contrainte plus naturelle, facilitant l'observation des interactions cellulaires et le développement de modèles plus représentatifs des tissus humains [20]. De même, les protéines cristallisent de manière plus ordonnée en microgravité, améliorant leur analyse structurale et pouvant favoriser la conception de médicaments plus efficaces sur Terre [21]. De plus, en microgravité, il n'y a pas de formation d'agrégats dans les solutions et l'on peut envisager l'impression de matériaux biologiques complexes en 3D sans besoin de matrice comme c'est le cas sur Terre [22].

Ainsi, cet environnement particulier ouvre la voie à des nouvelles voies de compréhension des mécanismes chimiques ou biologiques, avec des applications directes pour la santé humaine sur Terre. Des chercheurs, ainsi que des laboratoires pharmaceutiques, s'intéressent à ces phénomènes biologiques pour se positionner sur des recherches de pointe

Médecine spatiale et développements technologiques

Dans l'espace, les astronautes sont des patients isolés, nécessitant une prise en charge particulière. Actuellement, les équipages de la station spatiale internationale sont assez proches de la Terre ce qui leur donne accès à : une équipe de médecins dédiée au sol pour un suivi médical continu, un approvisionnement régulier, et la possibilité de procéder à une évacuation d'urgence en quelques heures.

Cependant, le suivi de la santé des équipages, en particulier pour les futures missions lointaines, ne peut pas toujours reposer sur un accès immédiat aux spécialistes localisés sur Terre. Il est donc nécessaire de favoriser l'autonomie médicale de l'équipage. Les sujets traités pour assurer ce suivi recourent de nombreuses priorités de santé nationales

autour de la médecine personnalisée, l'accessibilité médicale, l'utilisation du digital, de l'intelligence artificielle et des objets connectés. Le spatial représente alors un vecteur d'innovation pour les technologies médicales.

Communication et télé-médecine

Le recours aux communications par satellite pour la télé-médecine dans les missions spatiales remonte aux débuts de l'exploration spatiale habitée. Dès les années 1960, la NASA a mis en place des systèmes de transmission de données biomédicales afin de surveiller la santé des astronautes en temps réel [23]. Les premiers capteurs mesuraient des paramètres vitaux tels que le rythme cardiaque et la température corporelle, envoyés aux équipes médicales au sol via des liaisons radio et satellites. Avec le développement des stations spatiales, ces systèmes se sont perfectionnés, intégrant la transmission d'images médicales et des communications vidéo pour des consultations à distance [24]. Ces avancées ont non seulement amélioré la sécurité des astronautes, mais ont aussi ouvert la voie à l'usage de la télé-médecine pour des zones isolées sur Terre.

Les missions lointaines posent toutefois d'importants défis en matière de télécommunications par satellite. L'un des principaux obstacles est le délai de communication, qui peut atteindre jusqu'à 20 minutes pour un signal aller simple entre la Terre et Mars, rendant toute interaction en temps réel impossible. Ce retard complique les interactions, essentielles pour la télé-médecine, le contrôle des systèmes et la prise de décisions en situation d'urgence. Pour y remédier, les agences spatiales explorent des solutions nouvelles pour proposer des débits plus élevés et une latence réduite par rapport aux systèmes radiofréquences traditionnels et des systèmes d'intelligence artificielle capables d'assister les astronautes localement en attendant une réponse différée depuis la Terre [25].

Imagerie médicale et milieu spatial

L'imagerie médicale en milieu spatial, comme en milieu terrestre, joue un rôle crucial dans le suivi de la santé des astronautes lors des missions de courte et longue durée. Cependant, l'environnement spatial impose des contraintes techniques majeures, notamment la miniaturisation des équipements, la limitation des ressources énergétiques et la nécessité d'une autonomie diagnostique. Les technologies d'imagerie embarquées doivent donc être adaptées pour fonctionner en microgravité et fournir des diagnostics précis avec des ressources limitées. Le seul type d'imagerie actuellement utilisé à bord de l'ISS en dehors de l'OCT est l'échographie, qui permet d'examiner en temps réel divers organes et d'évaluer des conditions médicales comme les troubles musculosquelettiques ou les calculs rénaux. Des travaux sont également en cours autour de solutions innovantes telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) bas champ ou l'imagerie optique avancée.

Le CNES est pionnier sur les sujets liés à l'imagerie, avec de nombreux développements notamment sur l'échographie à distance. Le Centre d'aide au développement des activités en micropesanteur et des opérations spatiales du CNES (CAD-MOS) a développé une nouvelle génération d'échographe

pour que des médecins, depuis le sol, puissent prendre la main à distance, sur l'équipement à bord de la station spatiale [26]. L'expert peut également, à distance, modifier les réglages de l'échographe (gain, profondeur d'analyse, etc.) ainsi que sélectionner les fonctions nécessaires pour l'examen. Cette technologie a été testée pour les missions spatiales mais également pour un usage terrestre [27].

Encore plus récemment, dans le cadre du projet Spaceship FR du CNES [28], un partenariat avec la Société française de radiologie (SFR) a permis de travailler sur la trousse de radiologie interventionnelle pour les futures bases lunaires ou martiennes [29]. L'idée étant de prendre en compte les contraintes spatiales afin de concevoir une boîte à outil pertinente contenant tout le matériel de base nécessaire pour une intervention de radiologie interventionnelle, soit une sonde d'échographe, un cathéter, un drain, des aiguilles et un anesthésiant, pour un futur usage sur la Lune ou sur Mars. Cet outil a été testé lors d'une mission analogue en juillet 2023 où les astronautes devaient – sur un bloc de silicone et avec guidage échographique – réaliser un drainage d'un abcès profond, comme s'ils étaient face à un cas de cholécystite. Ils avaient à leur disposition les supports pédagogiques (cours, vidéo et notice visuelle de drainage) préparés par les équipes. Cette étude a démontré qu'il est possible d'apprendre à des personnes non radiologues une procédure normée de drainage de collections [30]. Le groupe de travail conjoint, dénommé Interventional Radiology in Space (IRIS) poursuit la validation en condition d'impesanteur des modalités thérapeutiques mini-invasives.

Par ailleurs, l'essor des outils d'intelligence artificielle, et tout particulièrement l'applications des réseaux de convolution, donne lieu à des applications conjointes tant pour l'optimisation de l'analyse satellitaire que pour l'optimisation des images dans le domaine de la santé comme illustré par le travail conjoint porté par les équipes du CNES autour des modèles convolutifs génératifs appliqués à l'imagerie du cancer [31].

Les données d'observation de la Terre au service de la santé

La télédétection fournit des données d'observation de la Terre qui peuvent être particulièrement utiles pour la cartographie et la modélisation en santé. En effet, les images satellites et plus généralement les données spatialisées, permettent l'identification de variables environnementales et climatiques qui influencent les dynamiques spatio-temporelles des maladies [32] et qui peuvent être intégrées dans une approche globale d'évaluation de l'état de l'environnement et de la santé de la population. Les risques sanitaires sont multifactoriels et résultent de mécanismes complexes impliquant de nombreuses composantes qui interagissent à des échelles temporelles et spatiales variées [33]. Les maladies infectieuses impliquent des interactions entre des agents pathogènes, leurs vecteurs et réservoirs potentiels, des hôtes humains ou animaux, et sont notamment influencées par les conditions environnementales et climatiques, les comportements individuels et sociétaux et l'offre et l'accès aux soins [34,35]. Les maladies non infectieuses peuvent résulter d'une exposition environnementale à des polluants, ou à des conditions envi-

ronnementales dégradées. Il est donc essentiel de mettre en place des approches interdisciplinaires pour surveiller et contrôler les risques sanitaires liés à l'environnement [36,37]. Un tel constat a conduit la communauté scientifique à s'entendre sur la nécessité d'approches intégrées, désignées notamment par le terme d'une seule santé (*one health*) [38] ou plus récemment de santé planétaire (*planetary health*), qui promeut des politiques fondées sur l'idée que la santé humaine et la santé de l'environnement sont profondément imbriquées [39]. Ces approches sont favorisées par les outils des sciences participatives et de la science ouverte (exemple du projet européen MOSAIC [40]), dans lesquelles les citoyens ont la possibilité de contribuer directement à la collecte de données, ces données et les outils utiles à leur traitement étant désormais de plus en plus librement accessibles pour la société civile.

Usage des données d'observation de la Terre pour la recherche en santé-environnement

L'usage des données d'observation de la Terre par satellite pour la santé a débuté dans les années 1970 avec les premiers satellites d'imagerie. La diversité actuelle des capteurs satellite permet d'accéder à des données à une résolution spatiale et temporelle suffisamment élevée pour (i) caractériser différentes variables environnementales et climatiques (occupation du sol, précipitations, température, humidité, etc.), (ii) développer des méthodes et outils de prévision des risques sanitaires, et ce, à différentes échelles et (iii) contribuer à la surveillance de l'évolution de ces risques. Ces travaux reposent sur des méthodes avancées de traitement d'images satellite multi-capteurs et multi-résolutions, qui fournissent des connaissances indirectes sur des composantes de l'environnement et du climat qui sont liées aux risques sanitaires pour les populations : les infrastructures présentes, la densité urbaine, l'activité industrielle, la végétalisation ou encore les îlots de chaleur. L'observation de la Terre permet aussi de mesurer certains indicateurs favorisant le développement de certaines maladies tels que la qualité de l'air, l'humidité des sols, la qualité et le niveau de l'eau. Ces différents indicateurs permettent de produire des cartes de risques favorisant des actions ciblées et optimisées de la part des autorités de santé. Par exemple, le service de surveillance de l'atmosphère de Copernicus [41] fournit en temps réel des informations continues sur la composition atmosphérique et en particulier les particules fines. De nombreux autres paramètres font également l'objet d'un même suivi et de mise à disposition des résultats : PM_{2,5}, NO₂, ozone, CO, poussières, pollens... [42].

La production d'outils d'aide à la décision à destination des acteurs de santé publique passe par l'intégration de ces variables issues de la télédétection couplées à d'autres types d'information spatiale (notamment des données in situ) dans des approches de modélisation. Ces modèles permettent la prise en compte d'un grand nombre de variables (notamment environnementales et climatiques) dans des systèmes complexes dynamiques et améliorent la compréhension des mécanismes de transmission des maladies, qui représentent un enjeu majeur de santé publique.

Des méthodes opérationnelles pour la surveillance des maladies

Des méthodes opérationnelles reposant sur la télédétection et la modélisation se sont multipliées ces dernières années dans le domaine de la santé. La surveillance des maladies à vecteurs par satellite représente une avancée majeure dans la lutte contre les épidémies transmises par des agents tels que les moustiques [43] ou les tiques. En utilisant des images satellitaires et des techniques de télédétection, les scientifiques peuvent identifier les conditions environnementales favorisant la présence et la prolifération des vecteurs, comme l'humidité, la température et la végétation. Ces informations permettent d'anticiper les risques d'épidémie et d'orienter les stratégies de prévention et de contrôle, notamment en ciblant les zones à risque pour des campagnes de vaccination, de pulvérisation d'insecticides ou de sensibilisation des populations. Arbocarto par exemple est un outil opérationnel intégrant des données d'observation de la Terre, basé sur la modélisation mécaniste du cycle de vie des moustiques qui permet de cartographier les densités de moustiques à une échelle spatiale adaptée à l'organisation d'actions de surveillance et de contrôle des populations vectrices [44]. L'outil est déjà déployé au sein de plusieurs agences régionales de santé (ARS) et très utilisé notamment à la Réunion. Dans son « Avis sur les risques sanitaires de la dengue et autres arboviroses à *Aedes* en lien avec le changement climatique » [45], publié le 3 avril 2023, le Comité de veille et d'anticipation des risques sanitaires (COVARIS) identifie le logiciel Arbocarto comme un outil pertinent pour l'enregistrement des données et le suivi des populations de moustiques. Plus récemment des travaux de thèse financés par le CNES et la région Occitanie ont montré l'importance des données entomologiques collectées sur le terrain par les agences de lutte antivectorielle, couplées à des données d'observation de la Terre, dans la mise en place de modèles destinés à améliorer les protocoles de surveillance et à optimiser les actions sur le terrain [46].

D'autres activités opérationnelles, financées par le Space Climate Observatory (SCO) du CNES et menées dans le cadre du projet ClimHealth visent à intégrer l'information climatique et environnementale issue des satellites dans les systèmes de surveillance sanitaire pour développer l'alerte précoce et guider le contrôle des maladies [47]. Ce projet a permis de développer deux démonstrateurs de système d'alerte précoce en ligne pour fournir des informations sur les environnements propices à la transmission de maladies : LeptoYangon, un outil local pour prévenir la leptospirose au Myanmar [48], puis ClimHealth, l'outil générique qui peut adresser toutes les maladies et symptômes influencés par l'environnement. Adaptable en tout lieu, l'application est disponible en open source [49]. Des modèles de mobilité animale, intégrant en entrée des variables environnementales dérivées d'images de télédétection, ont récemment été développés pour mieux comprendre les interactions entre faune domestique et faune sauvage, et le risque d'émergence d'agents infectieux dans les zones d'interface [50]. Les méthodes de caractérisation des habitats des réservoirs sauvages et de leur connectivité peuvent ainsi permettre de cibler les actions de surveillance, comme par exemple pour la Peste Porcine Africaine dans le Nord de l'Italie [51]. Enfin, pour les maladies liées à des expositions

aux pesticides, des modèles intégrant des séries temporelles de cartes d'occupation du sol, combinées à des informations sur les pratiques culturelles et de traitements, permettent de caractériser l'exposition des populations sur le temps long [52].

Perspectives

Les perspectives de l'utilisation de l'information spatiale, et en particulier des images d'observation de la Terre, pour mieux comprendre, prédire et prévenir les risques de transmission de maladies, sont nombreuses. Tout d'abord, et malgré leur développement exponentiel, l'application de ces techniques de télédétection et de modélisation spatiale reste à faire pour beaucoup de maladies dans de nombreux territoires. L'exactitude des cartes prédictives de ces maladies doit aussi être vérifiée sur le terrain, nécessitant des collaborations pluridisciplinaires entre des spécialistes en entomologie, en épidémiologie, en écologie et en télédétection. Outre les approches biologiques, les modèles sociaux et comportementaux sont importants pour la prévention et le contrôle des maladies. Ces facteurs socio-anthropologiques ne peuvent être déduits des seules techniques de télédétection. Une des pistes intéressantes qu'ouvre la modélisation est la possibilité de tester des scénarios futurs de changements et d'étudier leurs potentiels impacts sur les risques sanitaires. Par exemple, l'impact des changements climatiques sur la distribution et l'abondance des populations de vecteurs, ainsi que sur le risque de transmission d'agents pathogènes, peut être étudié par la modélisation.

Conclusion

Les recherches en médecine spatiale et les technologies développées pour l'exploration de l'espace offrent des bénéfices considérables, tant pour la santé des astronautes que pour l'amélioration des soins médicaux sur Terre. La France, par ses initiatives et son expertise, joue un rôle majeur dans ces avancées, ouvrant la voie à une meilleure prise en charge médicale à l'ère du numérique et des missions spatiales de longue durée.

Le spatial se traduit également par de nombreux services et des données issues des satellites qui permettent de contribuer à mieux caractériser les liens environnement-santé ou climat-santé et pour développer des services opérationnels comme des cartes à risques prédictives.

Ainsi, la recherche spatiale mais aussi les données et autres services issus du spatial peuvent contribuer à améliorer les connaissances médicales, ou à encore développer des technologies innovantes ou de nouveaux services pour la santé humaine.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Dietrich D, Dekova R, Davy S, Fahrni G, Geissbühler A. Applications of space technologies to global health: scoping review. *J Med Internet Res* [Internet] 2018;20(6):e230 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6041558/>].
- [2] Donnez plus d'espace à vos idées | Connect by CNES [Internet]. [cité 21 mars 2025. Disponible sur : <https://www.connectbycnes.fr/>].
- [3] Maillet A, Pavy-Le Traon A. MEDES clinical research facility as a tool to prepare ISSA space flights. *Acta Astronaut* [Internet] 1998;43(3-6):321-8 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11541934/>].
- [4] Delp MD, Charvat JM, Limoli CL, Globus RK, Ghosh P. Apollo lunar astronauts show higher cardiovascular disease mortality: possible deep space radiation effects on the vascular endothelium. *Sci Rep* [Internet] 2016;6(1):29901 [cité 20 mars 2025. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/srep29901>].
- [5] White RJ, Avern M. Humans in space. *Nature* 2001;409(6823):1115-8.
- [6] Custaud M-A, Blanc S, Gauquelin-Koch G, Gharib C. L'humain et l'espace ; ses adaptations physiologiques. Books on demand. Grand format. Librairie Gallimard Paris [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.librairie-gallimard.com/livre/9782322270620-l-humain-et-l-espace-ses-adaptations-physiologiques-marc-antoine-custaud-stephane-blanc-guillemette-gauquelin-koch-claude-gharib/>].
- [7] Pavy-Le Traon A, Heer M, Narici MV, Rittweger J, Vernikos J. From space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *Eur J Appl Physiol* [Internet] 2007;101(2):143-94 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17661073/>].
- [8] Tomilovskaya E, Shigueva T, Sayenko D, Rukavishnikov I, Kozlovskaya I. Dry immersion as a ground-based model of microgravity physiological effects. *Front Physiol* [Internet] 2019;10:284 [cité 20 mars 2025. Disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6446883/>].
- [9] Navasiolava NM, Custaud MA, Tomilovskaya ES, Larina IM, Mano T, Gauquelin-Koch G, et al. Long-term dry immersion: review and prospects. *Eur J Appl Physiol* [Internet] 2011;111(7):1235-60 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21161267/>].
- [10] Robin A, Van Ombergen A, Laurens C, Bergouignan A, Vico L, Linossier MT, et al. Comprehensive assessment of physiological responses in women during the ESA dry immersion VIVALDI microgravity simulation. *Nat Commun* [Internet] 2023;14(1):6311 [Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/s41467-023-41990-4>].
- [11] Garrett-Bakelman FE, Darshi M, Green SJ, Gur RC, Lin L, Macias BR, et al. The NASA Twins Study: a multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science* [Internet] 2019;364(6436):eaau8650 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aau8650>].
- [12] Sides MB, Vernikos J, Convertino VA, Stepanek J, Tripp LD, Draeger J, et al. The Bellagio report: cardiovascular risks of spaceflight: implications for the future of space travel. *Aviat Space Environ Med* [Internet] 2005;76(9):877-95 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=24644501157&partnerID=8YFLogxK>].
- [13] Navasiolava NM, Dignat-George F, Sabatier F, Larina IM, Demiot C, Fortrat JO, et al. Enforced physical inactivity increases endothelial microparticle levels in healthy volunteers. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* [Internet] 2010;299(2):H248-56 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20472757/>].
- [14] Demangel R, Treffel L, Py G, Briocche T, Pagano AF, Bareille MP, et al. Early structural and functional signature of 3-day human skeletal muscle disuse during the dry immersion model. *J Physiol* [Internet] 2017;595(13):4301-15 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28326563/>].

- [15] LeBlanc A, Schneider V, Shackelford L, West S, Oganov V, Bakulin A, et al. Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. *J Musculoskelet Neuronal Interact* [Internet] 2000;1(2):157–60 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15758512/>].
- [16] Vico L, van Rietbergen B, Vilyayphiou N, Linossier MT, Locrelle H, Normand M, et al. Cortical and trabecular bone microstructure did not recover at weight-bearing skeletal sites and progressively deteriorated at non-weight-bearing sites during the year following international space station missions. *J Bone Miner Res* [Internet] 2017;32(10):2010–21 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28574653/>].
- [17] Rynders CA, Blanc S, DeJong N, Bessesen DH, Bergouignan A. Sedentary behaviour is a key determinant of metabolic inflexibility. *J Physiol* [Internet] 2018;596(8):1319–30 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28543022/>].
- [18] Galdamez LA, Mader TH, Ong J, Kadipasaoglu CM, Lee AG. A multifactorial, evidence-based analysis of pathophysiology in spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS). *Eye Lond Engl* [Internet] 2025;39:700–9 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39827235/>].
- [19] Nelson ES, Jules K. The microgravity environment for experiments on the International Space Station. *J Gravitational Physiol J Int Soc Gravitational Physiol* [Internet] 2004;11(1):1–10 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16145793/>].
- [20] Ghani F, Zubair AC. Discoveries from human stem cell research in space that are relevant to advancing cellular therapies on Earth. *NPJ Microgravity* [Internet] 2024;10(1):1–9 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/s41526-024-00425-0>].
- [21] Reichert P, Prorise W, Fischmann TO, Scapin G, Narasimhan C, Spinale A, et al. Pembrolizumab microgravity crystallization experimentation. *NPJ Microgravity* [Internet] 2019;5(1):1–8 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/s41526-019-0090-3>].
- [22] Van Ombergen A, Chalupa-Gantner F, Chansoria P, Colosimo BM, Costantini M, Domingos M, et al. 3D bioprinting in microgravity: opportunities, challenges, and possible applications in space. *Adv Healthc Mater* [Internet] 2023;12(23):e2300443 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37353904/>].
- [23] Simpson AT. A brief history of NASA's contributions to telemedicine. [Disponible sur : <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/03/nasatelemedicine-briefhistory.pdf>].
- [24] Nicogossian AE, Pober DF, Roy SA. Evolution of telemedicine in the space program and earth applications. *Telemed J E-Health* [Internet] 2001;7(1):1–15 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11321704/>].
- [25] Karmous S, Adem N. Connecting the universe: challenges, mitigation, advances, and link engineering [Internet]. arXiv; 2023 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <http://arxiv.org/abs/2302.09518>].
- [26] Arbeille P, Chaput D, Zuj K, Depriester A, Maillet A, Belbis O, et al. Remote echography between a ground control center and the international space station using a tele-operated echograph with motorized probe. *Ultrasound Med Biol* [Internet] 2018;44(11):2406–12 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301562918302679>].
- [27] SpaceOps Conferences [Internet]. [cité 6 mars 2025]. Remote Echography between CNES Space Control Center and the ISS Using Tele Operated “Echograph with Motorized Probe”. Application to Isolated Medical Centre on Earth. [Disponible sur : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-2516>].
- [28] Spaceship FR | CNES [Internet]. [cité 21 mars 2025. Disponible sur : <https://cnes.fr/projets/spaceship>].
- [29] Vidal V, Boyer L, Luciani A, SFR-CNES collaborative group. Bringing interventional radiology to Mars! *Cardiovasc Intervent Radiol* [Internet] 2023;46(4):425–7 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36918421/>].
- [30] Frandon J, Soussan J, Vidal V, Nikolov T, Rubino B, Luciani A, et al. Expanding the horizons of interventional radiology: training analog astronauts for percutaneous drainage in preparation for deep space exploration. *Cardiovasc Intervent Radiol* [Internet] 2024;47(3):391–3 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38062173/>].
- [31] Mulé S, Lawrance L, Belkouchi Y, Vilgrain V, Lewin M, Trillaud H, et al. Generative adversarial networks (GAN)-based data augmentation of rare liver cancers: the SFR 2021 Artificial Intelligence Data Challenge. *Diagn Interv Imaging* [Internet] 2023;104(1):43–8 [Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211568422001711>].
- [32] Marti R, Li Z, Catry T, Roux E, Mangeas M, Handschumacher P, et al. A mapping review on urban landscape factors of dengue retrieved from earth observation data, GIS techniques, and survey questionnaires. *Remote Sens* [Internet] 2020;12(6):932 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/6/932>].
- [33] Briggs DJ. A framework for integrated environmental health impact assessment of systemic risks. *Environ Health* [Internet] 2008;7(1):61 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-61>].
- [34] Lambin EF, Tran A, Vanwambeke SO, Linard C, Soti V. Pathogenic landscapes: Interactions between land, people, disease vectors, and their animal hosts. *Int J Health Geogr* [Internet] 2010;9(1):54 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://doi.org/10.1186/1476-072X-9-54>].
- [35] Gallana M, Ryser-Degiorgis MP, Wahli T, Segner H. Climate change and infectious diseases of wildlife: altered interactions between pathogens, vectors and hosts. *Curr Zool* [Internet] 2013;59(3):427–37 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://doi.org/10.1093/czoolo/59.3.427>].
- [36] Moore CG. Interdisciplinary research in the ecology of vector-borne diseases: opportunities and needs. *J Vector Ecol J Soc Vector Ecol* [Internet] 2008;33(2):218–24 [Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19263839/>].
- [37] Brisbois BW, Ali SH. Climate change, vector-borne disease and interdisciplinary research: social science perspectives on an environment and health controversy. *EcoHealth* [Internet] 2010;7(4):425–38 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s10393-010-0354-6>].
- [38] Lainé N, Morand S. Linking humans, their animals, and the environment again: a decolonized and more-than-human approach to “One Health”. *Parasite Paris Fr* [Internet] 2020;27:55 [Disponible sur : <https://www.parasite-journal.org/articles/parasite/full.html/2020/01/parasite200055/parasite200055.html>].
- [39] Myers SS. Planetary health: protecting human health on a rapidly changing planet. *Lancet Lond Engl* [Internet] 2017;390(10114):2860–8 [Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140673617328465>].
- [40] Home – MOSAIC [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.mosaic-planetaryhealth.eu/>].
- [41] Home | Copernicus [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://atmosphere.copernicus.eu/>].
- [42] Roux E, Ignotti E, Bègue N, Bencherif H, Catry T, Dessay N, et al. Toward an early warning system for health issues related to particulate matter exposure in Brazil: the feasibility of using global PM2.5 concentration forecast products. *Remote Sens* [Internet] 2020;12(24):4074 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4074>].
- [43] Librairie Quae [Internet]. [cité 6 mars 2025]. Télédétection et modélisation spatiale appliquées à l'épidémiologie – Surveillance et contrôle des maladies transmises par les moustiques – (EAN13 : 9782759236299) | Librairie

- Quae : des livres au cœur des sciences. [Disponible sur : <https://www.quae.com/produit/1784/9782759236299/teledetection-et-modelisation-spatiale>].
- [44] Complementarity of empirical and process-based approaches to modelling mosquito population dynamics with *Aedes albopictus* as an example—Application to the development of an operational mapping tool of vector populations. *PLOS One* [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0227407>].
- [45] enseignementsup-recherche.gouv.fr [Internet]. Avis du COVARs du 3 avril 2023 – Risques sanitaires de la Dengue du Zika et du Chikungunya en lien avec le changement climatique; 2023 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/avis-covars-3-avril-2023-risques-sanitaires-de-la-dengue-du-zika-et-du-chikungunya-90374>].
- [46] Teillet C, Devillers R, Tran A, Catry T, Marti R, Dessay N, et al. Exploring fine-scale urban landscapes using satellite data to predict the distribution of *Aedes* mosquito breeding sites. *Int J Health Geogr* [Internet] 2024;23(1):18 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://doi.org/10.1186/s12942-024-00378-3>].
- [47] ClimHealth. Space for Climate Observatory [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.spaceclimatobservatory.org/fr/climhealth>].
- [48] ClimHealth – Leptospirosis Yangon [Internet]. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://leptoyangon.geohealthresearch.org/>].
- [49] GitLab [Internet]. ESPACE-DEV/GeoHealth/ClimHealth/GitLab; 2023 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://framagit.org/espace-dev/geohealth/climhealth>].
- [50] Rumiano F, Miguel E, Dufleit V, Degenne P, Gaucherel C, Valls-Fox H, et al. Spatial mechanistic modelling to simulate movements and contacts between wildlife and livestock in Southern Africa. *Ecol Model* [Internet] 2024;498:110863 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380024002515>].
- [51] Faustini G, Soret M, Defossez A, Bosch J, Conte A, Tran A. Habitat suitability mapping and landscape connectivity analysis to predict African swine fever spread in wild boar populations: a focus on Northern Italy. *PLoS One* [Internet] 2025;20(1):e0317577 [cité 6 mars 2025. Disponible sur : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0317577>].
- [52] Tran A. DV. Agri-STAMP: a spatial model representing the use and fate of pesticides over the long term [Internet]. CIRAD. [cité 6 mars 2025. Disponible sur : https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=612168].