

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE

Sciences de la vie et exploration humaine de l'espace

Membres du groupe: David Bouchez, Jérôme Cachot, Guillemette Gauquelin-Koch (thématicienne) Hélène Giraudo, Didier Le Ray, Jean-Luc Morel (Président), Julie-Anne Nazarre, Jean-François Quignard, , Yannick Saintigny, Samuel Valable.

Aujourd'hui, le groupe de travail Sciences de la Vie a pour objectif d'accompagner l'exploration de l'Espace et la présence humaine sur la Lune et sur Mars.

Les recherches menées depuis 50 ans ont permis d'accumuler de nombreux savoirs sur les modifications physiologiques de l'humain induites par les vols spatiaux en orbite basse. Si jusqu'à présent, toutes ces altérations étaient en partie réversibles et bien tolérées par l'organisme, notamment du fait de la courte durée des vols (environ six mois), il n'en sera pas de même avec les vols vers la Lune et à plus long terme Mars. La durée de vol, le niveau de radiation plus élevé, le délai des contacts avec la Terre, et l'impossibilité de retour rapide sur Terre en cas d'urgence sont désormais à prendre en compte et nécessitent l'adaptation de la médecine préventive et curative. La proposition d'un entraînement personnalisé pour maintenir les performances physiques et cognitives, le développement de capteurs spécifiques placés sur les sujets pour améliorer le diagnostic, les moyens de téléopération et une médecine spatiale d'urgence pour réduire les délais d'intervention sont absolument nécessaires pour l'exploration humaine de la Lune et Mars. Les sciences de la vie sont leader pour la mise en place du support-vie (nutrition et recyclage de la matière organique) qui accompagneront ces longs voyages de l'exploration.

Au travers des questions majeures qui 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 contremesures et l'autonomie à bord. La prévention et le développement de programmes de contremesures efficaces passent par une compréhension approfondie des effets de l'environnement spatial (microgravité, confinement et radiation) sur l'ensemble des systèmes physiologiques et les aptitudes psychologiques et donc de la santé et des performances des astronautes.

La description des effets du vol spatial sur le vivant terrestre a débuté dès le début de la « conquête spatiale », et progresse toujours grâce aux modèles au sol (alitement ou bedrest, immersion sèche à la clinique Medes, confinement, simulateurs de radiations comme MarSimulator) financés conjointement par le Cnes et l'Esa, mais aussi grâce aux vols paraboliques permettant une micropesanteur réelle et les ballons pour la radiobiologie, et surtout aux expériences en orbite basse dans la Station Spatiale Internationale (ISS). Ces recherches doivent se poursuivre en particulier au travers de développements utilisant les analogues sol et les vols paraboliques, mais aussi en poursuivant l'utilisation de l'ISS et des vols automatiques (capsules, Bion,...) embarquant des expériences robotisées et en participant à la définition des moyens à venir comme le Gateway lunaire qui permettront une présence pérenne de l'humain sur la Lune. L'ensemble de ces moyens permettent une recherche de la cellule à l'organisme entier dans des approches précliniques et cliniques.

Les sciences de la vie sont la source de nombreuses collaborations internationales avec des partenaires européens de l'Esa mais aussi avec les États-Unis, la Russie, la Chine et les Emirats Arabes Unis tant pour des développements d'instruments de recherche en biologie spatiale que pour le suivi de la santé des astronautes. Par exemple, la France depuis 1982 est leader pour le suivi des paramètres osseux et cardiovasculaires des équipages internationaux.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

1.1. EN VOL SPATIAL : ISS ET BION M1

L'évaluation de la durée et de l'étendue des atteintes musculo-squelettiques et les moyens de les atténuer par des contremesures appropriées ont progressé grâce aux travaux des équipes

françaises. La densité des os porteurs des astronautes n'est pas récupérée 18 mois après le retour au sol et celle du radius, inchangée à la fin des missions, se dégrade progressivement après le retour. Les études d'échographie confirment des modifications structurelles vasculaires et l'étude de l'endothélium indique qu'il est moins réactif aux changements de pression artérielle, ce qui accroît le risque de dysfonction vasculaire. De plus, une modification du répertoire d'anticorps IgM observée chez deux des cinq astronautes étudiés, pourrait altérer la réponse immunitaire. A l'heure actuelle, les liens entre les altérations cardiovasculaires et immunitaires n'ont pas été mis en évidence. La perception visuelle et la représentation tactile et proprioceptive d'un objet en 3D sont aussi affectées lors du vol spatial confirmant l'implication de la gravité dans le traitement complexe des signaux sensoriels polymodaux.

Dans Bion-M1 (vol en 2015), la reprogrammation du système immunitaire montre une réduction de la production de nouveaux lymphocytes B. Grâce aux études sur des analogues sol (bed-rest, Concordia), il est désormais possible d'identifier des biomarqueurs pour surveiller le système immunitaire des astronautes. Le programme Bion s'est arrêté suite aux événements de février 2022 malgré le programme scientifique défini pour un vol M2 en 2023.

1.2. EN VOLS PARABOLIQUES

Le Cnes organise deux campagnes de vols paraboliques par an avec quatre à cinq études en sciences de la vie par campagne. Ces vols permettent de modifier rapidement et sur de courtes durées le niveau de gravité. Ils induisent ainsi la désorientation du système vestibulaire et de la proprioception qui permettent au sujet d'intégrer la gravité et sa position dans l'espace pour définir ses actions et ses mouvements. Ils ont permis de montrer que les apprentissages d'un mouvement de pédalage requièrent la gravité et que les individus bien adaptés aux conditions du vol ont un degré de flexibilité plus important. Dans le contrôle du geste et les corrections motrices associées en réponse à des perturbations transitoires et imprévisibles pendant la réalisation de l'action, l'hypergravité représentent un challenge beaucoup plus important pour le système sensorimoteur que la microgravité, suggérant des difficultés cognitives pendant les phases de décollage et d'atterrissage. Ces vols paraboliques permettent certes d'étudier tous les changements biologiques ou physiques induit par les changements rapides de gravité mais aussi de tester des gestes médicaux en micropesanteur, tests particulièrement pertinents avec le besoin de la médecine d'urgence en vol.

1.3. DANS LES STATIONS DE CONFINEMENT

Une des contraintes majeures vécues dans l'espace est le confinement qui se traduit par l'isolement social, la réduction du mouvement et du champ de vision (plus généralement un appauvrissement sensoriel) et la réduction des possibilités de s'extraire de la situation vécue. Lors des expériences de confinement Sirius (Moscou, 2020 et 2022), contrairement à l'hypothèse formulée à partir de l'expérience Mars500 (2010-2011), les états affectifs des individus ne sont pas modifiés. Ces données doivent être corrélées avec la performance des sujets dans diverses tâches routinières ou exceptionnelles via un simulateur de télé-opération couplé à des questionnaires validés lors des dernières campagnes. Des modifications du système immunitaire mises en évidence indiquent que le confinement, comme les radiations et la microgravité, impactent la qualité de la réponse immunitaire, pouvant compromettre la santé des astronautes lors des vols longs.

1.4. IMMERSION SÈCHE

L'immersion sèche (Fig1) est un modèle analogue de microgravité sur Terre qui reproduit les effets de la phase précoce du déconditionnement de la microgravité du vol spatial. Une approche globale a permis d'identifier des interactions possibles entre les systèmes physiologiques perturbés chez l'homme et la femme. Ces études permettent ainsi de proposer une méthode d'évaluation globale et intégrée des contremesures pouvant être développées dans les études cliniques et précliniques préparatoires à l'exploration et ce, en prenant en compte la différence de réponse entre les sexes, question importante en raison de la mixité des équipages. Les dernières campagnes ont décrit la cinétique des marqueurs de résorption et formation osseuses en lien avec ceux de

l'inflammation, la perturbation du microenvironnement de la fibre musculaire, une augmentation du disque intervertébral qui, associée à l'atrophie des muscles posturaux paravertébraux, favoriseraient les hernies discales et les douleurs associées. Enfin, une altération de la régulation du métabolisme du fer, pouvant expliquer l'anémie des astronautes, participerait aux détériorations des capacités physiques et cognitives en sensibilisant l'organisme au stress et aux radiations. Le métabolisme, carrefour et moteur des grandes fonctions, est lui aussi affecté. L'altération qualitative du microbiote intestinal suggère des modifications des réponses immunitaires et de la production des molécules postbiotiques (produites par le microbiote mais pas par les cellules du corps humain) comme l'ergothioneine connue pour participer à la bonne santé musculaire ; elle est actuellement en évaluation préclinique comme contremesure. Ces données renforcent le potentiel important de l'exercice physique comme contremesure puisqu'il module tous ces paramètres.

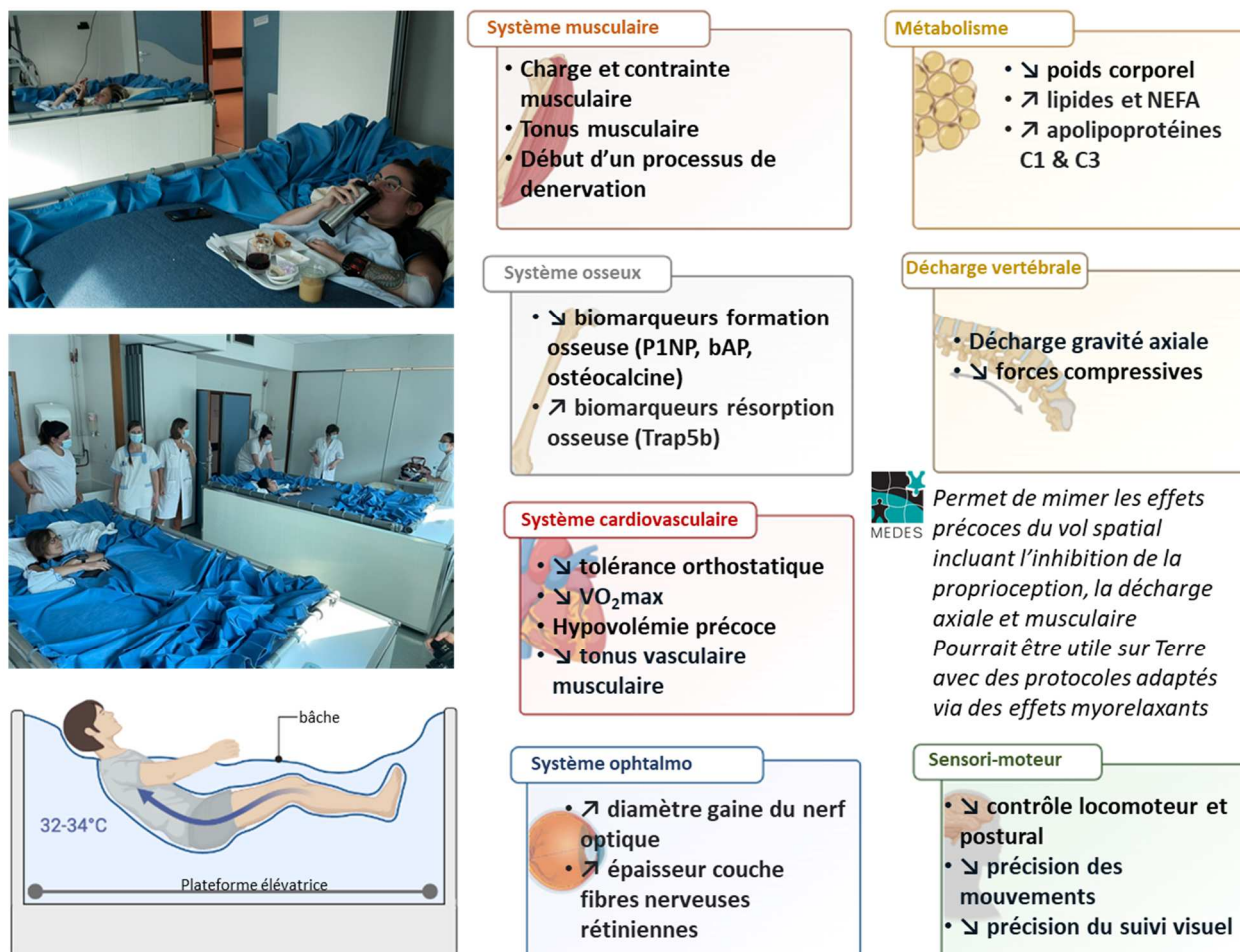


Figure 1 : Immersion sèche réalisée au Medes en 2023, représentation schématique de l'ensemble des effets de l'immersion sèche sur la physiologie humaine.

1.5. APPORTS DES MODÈLES PRÉCLINIQUES (NÉCESSAIRES AVANT LES ÉTUDES CHEZ L'HUMAIN)

Les modèles précliniques ont permis d'étudier des effets de la microgravité impossible à mettre en évidence chez l'humain comme l'efficacité réduite de la barrière hématoencéphalique, élément clé de la protection du cerveau ou le tendon d'Achille qui subit des altérations structurales et fonctionnelles qui persistent après l'hypogravité, identifiant un point de vigilance pour les futures missions de longue durée. Enfin, les études chez des ours hibernant (un modèle résistant à l'atrophie musculaire malgré une inactivité physique), des volontaires sains en bedrest et des souris (vol Bion-M1) convergent vers le ciblage des voies de signalisation spécifiques qui régulent la dégradation et la synthèse des protéines musculaires. L'utilisation d'extraits de sérum d'ours hibernant, sur des cultures de cellules musculaires humaines montre une réduction de l'atrophie musculaire induit par la microgravité. Ces résultats inattendus et novateurs ouvrant des perspectives thérapeutiques prometteuses et innovantes pour réduire l'atrophie musculaire au cours des vols spatiaux mais aussi dans la population générale sur Terre.

1.6. RADIOBIOLOGIE SUR CELLULES HUMAINES

L'objectif principal est d'estimer les risques cliniques liés aux radiations lors d'un séjour dans l'espace en prenant en compte la nature des radiations spatiales (dose, débit, énergie). Ainsi l'utilisation des ballons stratosphériques a permis de montrer que les cellules de l'os et du cristallin sont particulièrement sensibles aux radiations spatiales et de tester l'efficacité relative de différents blindages pour réduire les dommages de l'ADN. L'irradiation continue à faible débit produite dans MarSimulator induit un stress oxydatif constant tandis que les particules de faible énergie, via le relargage radio-induit du calcium intracellulaire, altèrent la signalisation intracellulaire.

1.7. SPATIALISATION DES DISPOSITIFS MÉDICAUX DE DIAGNOSTIC ET D'URGENCE

La spatialisation de l'échographie s'est poursuivie pour être télé-opérable depuis le sol. Les pratiques médicales d'urgence se sont développées par la définition d'une procédure de laryngoscopie testée en vol parabolique par le médecin urgentiste, pour un transfert de compétence à un membre d'équipage. Celle permettra une autonomie de l'équipage des vols de longues durées.

1.8. L'AQUACULTURE DE SUPPORT-VIE

La proposition d'une aquaculture spatiale lors du dernier SPS a été investiguée en testant au sol un système de transport d'embryons de poisson compatible avec les conditions de lancement (Lauve, Centre spatial de l'Université de Montpellier), suivi d'une courte période de microgravité simulée (Gravity, Gepam, Nancy) ou d'irradiation par neutron ou proton (Corafe, IRSN, Cadarache), démontrant la validité de la première étape d'une aquaculture spatiale puisque les embryons de poissons survivent et peuvent se développer (atteindre un stade adulte) suite à ces trois étapes cruciales de la mise en orbite.

1.9. LES PLANTES POUR LE SUPPORT-VIE

Les avancées majeures sur la compréhension des mécanismes d'adaptations des végétaux à la gravité auront une portée notamment au niveau du support-vie. La croissance des végétaux est conditionnée par leur capacité à percevoir les contraintes physiques telles que la gravité dont les mécanismes tissulaires ont été précisés et qui implique la modulation de 2000 gènes. Les expériences sur MarSimulator ont démontré que microgravité et radiations sont perçues comme des facteurs de stress qui peuvent modifier les qualités alimentaires de la plante et donc à terme la santé des astronautes.

Fort de ce bilan concernant la médecine spatiale et la mise en place d'un support vie adaptée, il apparait évident de poursuivre les efforts d'investigation en ciblant particulièrement la médecine préventive et personnalisée pour les astronautes. Ces travaux permettront, sur Terre, un meilleur suivi de certaines pathologies et de participer au développement de la télémédecine. De plus, les études en radiobiologie ont montré un impact important du bain de radiation tant sur les plantes que sur l'humain ce qui nous oblige à développer cette thématique de recherche pour les missions de type lunaire. Au-delà des aspects opérationnels, ces expériences conduites pour le support-vie en microgravité apportent des données uniques en biologie fondamentale que ce soit sur le développement embryonnaire des vertébrés ou sur l'impact de la gravité sur la croissance des végétaux.

2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

Pour rendre possible l'exploration humaine de l'espace, les programmes de recherche prendront en compte deux grands volets pour les prochaines années : la continuation de l'exploitation de l'ISS et des vols habités de courtes durées et des missions beaucoup plus distantes de la Terre comme la Lune (sur et en orbite de la Lune) voire Mars. Les orbites basses accueilleront des équipages comprenant des équipages plus diversifiés comprenant des astronautes entraînés et sélectionnés et des personnes moins entraînés. Ceux-ci devront néanmoins bénéficier d'une assistance médicale performante et adaptée. Les vols « plus loin et plus long », quant à eux, nécessiteront une surveillance particulière en vol, sur le sol lunaire et au retour sur Terre pour assurer la santé et les performances des équipages. Ainsi les programmes de recherche concernant la santé et la survie des équipages devront se concentrer sur la prise en charge de l'urgence médicale à bord des systèmes d'exploration, les moyens de diagnostic et de suivi médical, le

développement de contremesures efficaces et personnalisées, la définition d'un support-vie permettant la production d'aliments nutritifs et le recyclage de la matière organique et enfin la prise en compte de l'environnement lunaire pour une exploration humaine de notre satellite. Sur l'ensemble de ces points, les recommandations portent sur la poursuite de programmes pour lesquels les équipes françaises bénéficient d'atouts majeurs sur les autres nations spatiales (d'une part, grâce à sa filiale Novespace, le Cnes permet à l'ensemble de la communauté scientifique européenne et internationale de participer à des vols paraboliques mimant la microgravité ou des gravités partielles et d'autre part Medes est la seule clinique spatiale à disposer d'installation d'immersion sèche) et le développement de nouveaux axes de recherche pour lesquels une communauté de chercheurs est identifiée et prête à s'investir dans la recherche en biologie/santé spatiale. Ces recherches participeront également à apporter des connaissances pour l'humanité restée sur Terre en améliorant les systèmes de productions et de recyclage, la médecine d'urgence, les moyens de diagnostic à distance et la prise en charge de la santé des personnes forcées à l'inactivité et à une meilleure compréhension du vieillissement.

2.1. UNE NOUVELLE MÉDECINE SPATIALE : PRISE EN CHARGE DE L'URGENCE ET SUIVI AMBULATOIRE, UNE SPÉCIFICITÉ FRANÇAISE

La présence sur l'ISS de personnes non entraînées d'une part et des distances incompatibles avec un retour rapide depuis le Gateway ou la surface lunaire, imposent de développer une médecine spatiale en vol et tournée vers la prise en charge d'urgence. En particulier, le massage cardiaque et les insuffisances respiratoires sont vitaux et nécessitent des développements techniques pour une adaptation à la gravité réduite ou à l'impesanteur. Les travaux effectués dernièrement sur la laryngoscopie (Fig.2) par les équipes françaises leur donnent un avantage compétitif et elles bénéficieront des vols paraboliques pour la mise au point du matériel, de la procédure et de son transfert dans les mains du personnel de bord.



Figure 2: Le vol parabolique permet la validation du matériel médical et la mise au point du geste par le médecin spécialiste puis le transfert de compétence vers un personnel de bord (ISS, Gateway, station lunaire)

Cette médecine d'urgence doit se compléter par un dispositif diagnostic performant en lien avec les équipes médicales au sol si besoin. Pour cela, depuis quelques années, le Cnes a choisi de développer l'imagerie médicale par échographie. Un échographe pilotable à distance est déjà installé dans l'ISS, il va s'améliorer en utilisant les outils de l'IA pour aider le manipulateur à bord d'une station spatiale à trouver le meilleur emplacement de la sonde échographique pour envoyer aux médecins au sol une image de qualité diagnostique.

La proposition est de profiter du développement important depuis ces dernières années de cette technique d'imagerie médicale grâce à l'accroissement de la vitesse d'acquisition et de traitement du signal. La France est leader dans le domaine. Entre autres, une utilisation pour accéder à la perfusion sanguine intra-osseuse et le couplage avec le recueil d'autres paramètres physiologiques seront développés, une veille technologique et scientifique sera renforcée.

Cette nouvelle ère de la médecine spatiale verra également le développement de l'intégration de capteurs associés aux tenues des astronautes afin de suivre l'évolution de paramètres physiologiques et de prédire, en association avec leurs jumeaux numériques, les risques encourus et aider à la prise en charge de leur santé et donc de leurs performances. Il y aura une forte interaction entre le Cadmos (Centre d'Aide au Développement des Activités en Micropesanteur et

des Opérations Spatiales), le Spaceship (préparation d'une future base lunaire), la clinique Medes et les équipes de recherche biomédicales et celles qui développent ces nouveaux capteurs couplant paramètres physiologiques et dosages de biomarqueurs pour aboutir à une instrumentation permettant une recherche appliquée et un suivi médical avec et pour les équipages. Ces interactions permettront également de profiter pleinement des développements technologiques en cours dans les laboratoires sur l'instrumentation médicale.

La pharmacologie spatiale devra se développer avec l'allongement des durées et la diversité des missions à venir. Pour le suivi des équipages, il faudra compléter les données des capteurs de biomarqueurs avec des données de dosage plus précises et de pharmacocinétique des médicaments en vol. Pour cela, nous bénéficierons des avantages combinés de système de recueil d'échantillons compatibles avec le vol spatial (échantillons secs sur buvard) et de systèmes de mesures incluant de la microfluidique réduisant considérablement le volume des échantillons biologiques rendant moins nécessaire la spatialisation d'équipements de laboratoire et des retours d'échantillons coûteux.

La globalisation des données du suivi des biomarqueurs et paramètres physiologiques et de la pharmacologie spatiale améliorera la prise en charge des douleurs des équipages pendant et après le vol mais aussi de renforcer les études concernant les adaptations cardiovasculaires, métaboliques et immunitaires, mais également cognitives et psychiques des équipages. La santé cardiométabolique est cruciale pour maintenir l'homéostasie des autres fonctions physiologiques. L'immunité devra également répondre à des agents rendus infectieux par le vol spatial ou à résister à de nouveaux allergènes.

Aujourd'hui, la cognition regroupe l'ensemble des actions programmées par le cerveau comprenant la planification du geste, la mémoire, le traitement des informations sensorielles et émotionnelles, devenant un ensemble complexe qu'il faut étudier en intégrant ses différentes composantes. La poursuite des études comportementales dans l'ISS, de la planification de l'action ou du mouvement en vol paraboliques permettront de mieux permettre aux équipages de maintenir leurs performances cognitives en fonction de leur charge mentale. Les aspects de psychologie cognitive seront suivis lors des expériences conduites chez l'humain tant dans les expériences en vol que lors des expériences dans les analogues sol.

Les vols spatiaux habités vont dépasser l'orbite terrestre basse, avec notamment des missions exploratoires vers la Lune et Mars, y compris l'établissement d'une base avec équipage permanent sur la surface lunaire. Ces missions comportent des défis physiologiques et psychologiques. Les longues distances entraîneront des durées de mission plus longues avec un niveau croissant d'éloignement, d'isolement et de confinement. Des questions se posent concernant les performances optimales, le bien-être et la santé mentale de l'équipage dans des circonstances aussi extrêmes. Ces défis psychologiques doivent être relevés, car ils constituent des facteurs limitants pour le succès des missions exploratoires de longue durée. C'est pourquoi, des études d'isolement sont fondamentales pour étudier les effets du confinement et de l'isolement sur la santé, le comportement et les performances humaines. Celles-ci deviennent prioritaires pour l'ensemble des agences spatiales.

2.2. CONTREMESURES ADAPTÉES ET PERSONNALISÉES

Le suivi osseux des cohortes d'astronautes après leur vol a permis de démontrer la variabilité interindividuelle des réponses biologiques au vol spatial. Il est donc nécessaire d'adapter les contremesures à chaque astronaute. Pour cela, il faut définir en recherche préclinique quelles sont les combinaisons de contremesures (exercice physique, nutrition, pharmacologie, low body negative pressure, cuffs, centrifugation) les plus efficaces afin de les optimiser pour chacun par la suite. Aujourd'hui il est admis que l'efficacité de ces contremesures doit cibler le métabolisme cellulaire, l'inflammation, le stress oxydant, et les voies de l'atrophie et de la régénération cellulaire. Les voies de réparation de l'ADN devront également être investiguées à cause de leur efficacité à lutter contre les effets du bain de radiation. Les études se porteront de façon combinée sur les axes muscle-tendon-os, cardiovasculaire-immunité-cerveau qui semblent structurant. Ces études seront associées avec celles sur le métabolisme énergétique et le microbiote, qui ont des rôles centraux dans le fonctionnement physiologique et dont la sensibilité aux vol spatial est démontrée ; par exemple le microbiote est capable de produire des molécules post-biotiques nécessaires au bon

fonctionnement de l'individu. Ces contre-mesures prendront aussi en compte des composés prébiotiques stimulant ce microbiote associés avec d'autres compléments alimentaires et exercices physiques spécifiques proposés avant, pendant et après le vol. La priorité dans ce domaine sera d'étudier les effets de façon transversale et avec une approche multi-organes sur des modèles précliniques avant un test clinique.

2.3. Support-vie

Le support-vie peut être envisagé comme un ensemble complexe comprenant la production d'une nourriture adaptée aux besoins physiologiques en fonction des conditions de vie des équipages. La production d'un aliment adapté comprend l'étude de l'efficacité de la nutrition et les aspects de bien-être psychologique de l'alimentation. Les effets sur la santé mentale et physique de la réduction soudaine de l'accès à la nourriture due à des dysfonctionnements éventuels du support-vie sont aussi à intégrer. Cela implique également un suivi individualisé du statut énergétique et nutritionnel des astronautes afin de pouvoir adapter rapidement leur nutrition tout en prenant en compte leur pratique d'exercice physique. Dans l'éventualité d'un dysfonctionnement du support-vie, les astronautes risquent d'être contraints de limiter leurs apports caloriques et/ou hydriques pendant des périodes plus ou moins longues. Il est donc impératif d'évaluer l'impact de ces restrictions sur la santé humaine. Ces études fourniront également de nouvelles données sur les effets de l'hypométabolisme à moyen et long terme. Elles aideront à envisager des stratégies de baisse de la dépense énergétique des astronautes pour limiter les besoins et le coût associé des missions longues. Des données cliniques suggèrent que l'hypométabolisme ralentit les processus de vieillissement et de sénescence (pouvant faire l'objet d'applications en médecine sur Terre). Lors de ces expériences les aspects cognitifs seront suivis pour adapter et personnaliser les rations alimentaires aux performances cognitives et motrices.

Il s'agit aussi de produire de la nourriture selon un cercle vertueux de recyclage de la matière organique. Les études théoriques incluent végétaux terrestres, microorganismes et insectes, algues et poissons pour un recyclage efficace de l'eau et des nutriments organiques provenant de l'humain et de ses activités. Dans ce contexte, la poursuite des études sur des espèces végétales d'intérêts agronomiques et des espèces de poissons pouvant participer à la recréation de cet écosystème est indispensable pour connaître les propriétés nutritionnelles pour l'humain tout en assurant une activité socialement valorisante pour l'équipage. Enfin, il sera également indispensable de saisir les opportunités de conduire une recherche scientifique sur ces productions pour améliorer les connaissances fondamentales sur les effets des conditions spatiales (durées d'exposition à l'impesanteur et au bain de radiation, confinement) sur les végétaux, animaux et micro-organismes produits ou utilisés dans ce cadre.

2.4. ENVIRONNEMENT LUNAIRE : TOXICITÉ DU RÉGOLITHE LUNAIRE ET BAIN RADIATIF

Le retour des missions américaines a laissé entrevoir la toxicité potentielle du régolithe lunaire par les dysfonctions pulmonaires induites par les particules transportées sur les combinaisons dans l'habitacle des modules. Pour comprendre les effets biologiques et sanitaires de l'exposition au régolithe lunaire il faudra une synergie entre les thématiques concernés du Ceres (exobiologie et Sciences de la matière) pour connaître les propriétés physico-chimiques des particules du régolithe et sa dispersion aux alentours des humains présents sur la Lune. Des équipes de recherche en écotoxicologie des particules, modélisation préclinique et physiologie sont déjà identifiées et prêtes à élaborer les projets de recherche. Ces travaux seront nécessaires pour définir les moyens de prévention et de prise en charge suite à l'exposition aux particules de régolithe, ils pourront également participer aux travaux de recherche sur la prise en charge des équipes de secours qui, sur Terre, interviennent dans des ambiances polluées (poussières, suies, etc.). Il est nécessaire d'engager ces études le plus rapidement possible pour aboutir à une présence humaine sur la Lune en toute sécurité. Pour cela, des projets seront proposés à la Nasa

pour obtenir du régolithe provenant des missions lunaires américaines et feront l'objet de discussions et projets internationaux.

2.5. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Objectif scientifique	Observable Type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T	Commentaires
Rendre possible l'exploration humaine de l'espace	<p>Calibration du geste par le médecin puis l'équipage Couplage avec la téléopération</p> <p>Paramètres physiologiques et cognitifs lors des missions</p> <p>Ecotoxicité par contact avec l'environnement lunaire</p> <p>Nutrition / Balance énergétique Pharmacologie spatiale</p>	<p>Médecine d'urgence Vol parabolique</p> <p>Echographie vol spatial ISS</p> <p>Vol parabolique, confinement, immersion sèche, bed-rest, Etudes d'hypométabolisme</p> <p>Etudes précliniques sur les effets des poussières lunaires sur l'humain (Exobiologie, physique-chimie)</p> <p>Suivi de la santé au cours des missions Lune et Gateway Analogues sol et vol parabolique</p>	<p>Adapter les outils de médecine d'urgence en µg</p> <p>Intégration et validation en µg de capteurs et systèmes de dosage</p> <p>Stockage de régolithe</p>	<p>Pour le moment spécificité française</p> <p>Besoin de régolithe lunaire (collaboration Nasa)</p> <p>Objectifs Artemis</p>
Quel cocktail de contremesures pour assurer la santé en vol et après le retour sur Terre ?	Etudes précliniques et cliniques	<p>Test au sol sur animaux et cellules en culture exposés à la µg simulée et bain de radiations Transfert chez l'humain en analogues sol pour une personnalisation des contremesures</p>	Développement d'instruments pour des vols automatiques et ballons ; modélisation	Validation de contremesures personnalisées Meilleures connaissances sur les effets des conditions spatiales sur le vivant terrestre
Comment assurer le support-vie dans les stations ? (nutrition, etc)	Développement et qualités nutritionnelles d'une production végétale	Développement et composition des végétaux en conditions spatiales (Analogues sol, capsules)		Effets de la µg couplée au bain de radiation
	Qualités et conservation de l'aliment (ISS, Gateway)	Conservation (années) Propriétés nutritionnelles des aliments apportés ou produits		
	Développement d'une production d'aquaculture spatiale	Transport d'embryons et tests en vol spatial (développement et croissance)	Système d'emport (aquarium) des embryons de poissons et de leur milieu de vie	Essais sols préalables de fécondation après vibrations, µg et radiations

	Développer un système intégré bio-régénératif	Propriétés et qualité nutritionnelles et effets de l'alimentation produite		
--	---	--	--	--

Les priorités sont indiquées en gras dans le tableau. Une spécificité des sciences de la vie est de pouvoir tester rapidement de nouvelles technologies lors des vols d'astronautes français.

3. CONCLUSION

A l'occasion de la préparation de ce séminaire de perspectives, les équipes de recherche et le Cnes ont souligné l'importance d'une discussion renforcée avec le Cadmos et le Medes afin de mieux répondre aux différents appels d'offres et être force de proposition auprès de l'Esa. La tenue de neuf discussions scientifiques thématiques en visioconférence et d'un atelier d'un jour et demi au Cnes ont permis de structurer une communauté scientifique grandissante. L'ensemble des acteurs souhaitent poursuivre ces interactions afin d'accroître leur efficacité. Ces moments d'échanges ont permis au groupe de travail de définir les recommandations présentées mais aussi de définir des axes de réflexion allant bien au-delà des recommandations pour les cinq prochaines années.

Dans le domaine de l'exploration humaine de l'espace, le Cnes a déjà mis en place de nombreuses collaborations internationales notamment avec les Emirats Arabes Unis, les Etats-Unis (notamment programme Artemis d'exploration lunaire), Japon et bien sûr il faudra renforcer les interactions avec les nations européennes membres de l'Esa, et développer des collaborations avec les nations spatiales émergentes (Inde et Brésil) qui disposent d'une recherche dynamique dans les sciences de la vie et de la médecine. La France, grâce aux vols paraboliques, à la clinique spatiale (Medes) et au Cadmos dispose d'atouts majeurs pour valider des protocoles médicaux en impesanteur et des propositions originales et adaptées de contremesures. Les équipes de recherche proposent 1/ une recherche préclinique rapidement transférable pour les équipages et 2/ une recherche de pointe, appliquée et fondamentale, pour des propositions concrètes de support-vie qui pourront en partie se développer via le Spaceship. Enfin la synergie avec d'autres groupes de travail du Ceres permettra de définir les risques pour la santé des équipages de l'exposition au régolithe lunaire ainsi qu'au bain de radiations qui régnera dans le Gateway ou sur le sol lunaire.

Actuellement, de nombreuses études peuvent encore être menées dans l'ISS, celle-ci étant disponible au moins jusqu'en 2030. Des discussions internationales entre les agences sont également en cours pour « aménager » l'ISS afin de pouvoir simuler des vols lunaires ou martiens. Cela permettra de développer des recherches fondamentales et appliquées à l'exploration humaine.

De plus, les équipes françaises ont créé des dispositifs de formation pour les étudiants européens en biologie et médecine afin d'accompagner l'exploration humaine au travers de la création du master Erasmus Mundus Spacemed (universités de Caen, La Charité Berlin et Ljubljana, Slovénie) et de la demande Biospace dans le cadre l'appel Compétence et métiers d'avenir de l'ANR-France2030 pour un enseignement du lycée au doctorat.

Il est indispensable de rappeler que toutes ces recherches ont bien entendu de très nombreuses retombées sociétales que ce soit pour la meilleure compréhension de la physiopathologie de l'inactivité physique et de la sédentarité, fléau sociétal responsable de plus de 35 maladies chroniques, et le vieillissement ou pour l'accélération du développement d'appareils médicaux nécessaires au suivi médical personnalisé tant sur Terre que dans l'espace. Enfin les études liées au support-vie auront aussi des répercussions bénéfiques en agronomie qui seront particulièrement pertinentes dans le contexte de transition écologique actuel.